

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ اثر فاکتورهای خشک‌کردن بر چروکیدگی سیب خشک شده

سید جعفر هاشمی*^۱ و آزاده رنجبر ندامانی^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه مکانیک بیوسیستم- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری- مازندران، ساری، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳

چکیده

کنترل پارامترهای عملیات خشک‌کردن طی حذف آب از مواد غذایی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، از روش سطح پاسخ برای مطالعه اثر فاکتورهای مهم عملیات خشک‌کردن استفاده شد. ابتدا با کمک داده‌های تجربی مدل‌های تجربی مربوط به خشک‌کردن و چروکیدگی نمونه‌ها به دست آمدند. سپس تیمارهای بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت در غالب طرح غربالگری فاکتور روش سطح پاسخ طراحی شدند. فاکتورهایی مانند دمای خشک‌کردن (۶۰-۴۰ درجه سلسیوس)، سرعت هوای خشک‌کردن (۲/۵-۰/۵ متر بر ثانیه)، ضخامت نمونه‌ها (۷-۳ میلی‌متر)، قطر نمونه‌ها (۶-۴ سانتی‌متر) و زمان خشک‌کردن (۱۰۰۰۰-۶۰۰۰ ثانیه) در این مرحله مورد بررسی قرار گرفتند. این تیمارها در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شدند. اساس این محاسبات، عبور یک جریان آرام در درون یک محیط متخلخل بود. در این مرحله تغییرات مش در ابعاد x ، y و z که برای تعیین میزان چروکیدگی تعریف شده بودند، بر اساس معادلات تجربی انجام شد. نتایج نشان دادند دمای اولیه و برهمکنش‌های آن با سایر فاکتورهای مورد مطالعه، ضخامت نمونه و سرعت هوای ورودی روی دمای متوسط نمونه اثر معنادار داشت. نرخ رطوبت و مقدار رطوبت وابسته به زمان عملیات بودند. همچنین چروکیدگی نمونه یک رابطه لگاریتمی و تابع دمای هوای ورودی، ضخامت و زمان و مجذور ضخامت و زمان عملیات بود. این نشان می‌دهد با یافتن مدلی برای پیش‌گویی وضعیت خشک‌شدن نمونه میوه، امکان کنترل شرایط عملیات برای کاهش میزان چروکیدگی وجود دارد. به طوری که مشخص شد در ضخامت ۰/۷ سانتی‌متر، قطر ۵/۴۵ سانتی‌متر و زمان عملیات ۹۹۳۸ ثانیه، کمترین میزان چروکیدگی در سیب دیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی

چروکیدگی، خشک‌کردن سیب، مدل‌سازی، سطح پاسخ، شبیه‌سازی

مقدمه

روش‌های مختلف فرآوری، خشک‌کردن عملیاتی برای افزایش ماندگاری محصولات غذایی با رطوبت بالا، فرآوری آن‌ها ضروری است. در بین است که طی آن فعالیت آبی ماده غذایی با حذف آب از طریق پدیده تبخیر کاهش می‌یابد. اما کیفیت

محصولاتی که به روش سنتی خشک می‌شوند و طی تولید و نگهداری تحت تأثیر تغییرات بارزی قرار می‌گیرند، نسبت به ماده غذایی اصل کمتر است. تغییراتی که بر روی وضعیت ظاهری محصول بعد از خشک شدن مشاهده می‌شوند، عبارت‌اند از چروکیدگی، شکستگی بافتی، مهاجرت مواد جامد سخت شدن سطح و افت بازجذب آب و مواد فرار (Kurozawa *et al.*, 2012). یک تغییر مهم در حالت فیزیکی یک ماده غذایی طی خشک کردن، چروکیدگی است که بر کیفیت ماده نهایی اثر مهمی دارد و تغییرات زیادی در حجم محصول نهایی ایجاد می‌کند. یوان و همکاران (Yuan *et al.*, 2019) به بررسی مکانیسم چروکیدگی-تغییر شکل طی خشک کردن ورقه‌های سیب پرداختند. کورسیو و آورسا (Curcio & Aversa, 2014) یک مدل تئوری برای پیش‌بینی رفتار یک خشک‌کن جابجایی در شرایط گسترده‌ای از فرآوری پرداختند. روش آن‌ها بر مبنای جفت کردن پدیده‌های انتقالی بود که به طور همزمان انتقال مومنتوم، حرارت و جرم را هم در محفظه خشک‌کن و هم در ماده غذایی توصیف کند. کورسیو و آورسا (Curcio & Aversa, 2014) یک مدل مکانیک ساختاری نیز با هدف تخمین تغییر شکل نمونه ناشی از اتلاف رطوبت توسعه دادند. آن‌ها مشاهده کردند یک همخوانی مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی ناشی از خشک کردن استوانه‌هایی از سیب‌زمینی و پیش‌بینی‌های مدل‌ها وجود داشت. برازیلو و همکاران (Brasiello *et al.*, 2013) دو مدل ریاضی برای چروکیدگی بادنجان طی خشک کردن پیشنهاد دادند. سندیرا و همکاران (Wijitha Senadeera *et al.*, 2020) اثر دمای خشک‌کن (۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ درجه سانتیگراد) در سرعت هوای ۲/۳ متر بر ثانیه را بر میزان

چروکیدگی میوه خرمالو مورد بررسی قرار داده و مدل‌های تجربی برای آن یافتند. آن‌ها دریافتند که مدل پیچ بهترین برازش را در رابطه با نسبت رطوبت با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است. همچنین یک مدل درجه دوم را بر اساس تابعی از مقدار رطوبت برای چروکیدگی حجمی تعریف کردند. اونوود و همکاران (Daniel I Onwude *et al.*, 2018) با یک روش ابداعی به پایش چروکیدگی سیب زمینی شیرین پرداختند. آن‌ها از دمای ۷۰-۵۰ درجه سانتیگراد و ضخامت‌های ۶-۲ میلی‌متر نمونه استفاده کردند. با کمک تصویربرداری میزان مساحت سطحی و حجم نمونه‌ها پایش شد. آن‌ها دریافتند که رابطه بین رطوبت بدون بعد و چروکیدگی حجمی و مساحت سطحی خطی است. همچنین میزان چروکیدگی تحت تأثیر مقدار ضخامت نمونه، دمای خشک کردن، و زمان خشک کردن است. نوین و همکاران (Nguyen *et al.*, 2018) به بررسی میزان چروکیدگی و تخلخل سیستم‌های غذایی غیر سلولی طی خشک کردن پرداخته و رابطه بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های ریاضی را مطالعه کردند. آن‌ها ضمناً در این مطالعه دریافتند که دمای گذار شیشه‌ای یک فاکتور تعیین کننده روی تخلخل و تغییرات حجم نمونه طی خشک کردن محسوب می‌شود. رفیعی و همکاران (Rafiee *et al.*, 2010) توزیع رطوبت و انرژی فعال‌سازی ورقه‌های پرتقال طی خشک کردن در ۸۰-۴۰ درجه سانتیگراد در سرعت‌های هوای ۲-۰/۵ متر بر ثانیه با ضخامت‌های ۶-۲ میلی‌متر نمونه را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش دما و سرعت هوای خشک کردن، توزیع مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد ولی ضخامت نمونه اثری بر آن ندارد به همین دلیل هدف از این مطالعه یافتن شدت و اهمیت شرایط خشک کردن بر میزان و

جابجایی اجباری (مدل BM120، ۱۲۰L، ایران) با دمای ثابت ۶۰ درجه سانتیگراد و جریان هوای با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه انجام شد. مقدار رطوبت نمونه‌ها در زمان، به کمک رابطه ۱ محاسبه شد:

$$MC(t) = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،

$MC(t)$ = مقدار رطوبت در زمان، M_0 = وزن اولیه، M_t = وزن در زمان و تفاضل $M_0 - M_t$ = میزان جرم آب باقیمانده در محصول در هر لحظه. برای توزین نمونه‌ها، از ترازوی دیجیتالی (Jadever-Sky600، Korea) با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد.

نرخ رطوبت^۱

نرخ رطوبت با رابطه ۲ قابل محاسبه است (Aral & Bese, 2016):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن،

M_t = مقدار رطوبت در هر لحظه بر حسب وزن خشک، M_e = مقدار رطوبت تعادلی بر حسب وزن خشک و M_0 = مقدار رطوبتی اولیه بر حسب وزن خشک.

چروکیدگی

بعد از ثبت میزان ضخامت و قطر نمونه‌ها طی خشک‌کردن، چروکیدگی در بعد ضخامت و قطر از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$Shrinkage = \frac{X_0 - X_t}{X_f} \times 100 \quad (3)$$

که در آن،

X_0 = ضخامت/قطر در لحظه صفر، X_t = مقدار ضخامت/قطر در لحظه t و X_f = مقدار ضخامت/قطر در پایان عملیات (Curcio & Aversa, 2014).

شدت چروکیدگی میوه سیب است. با کمک این مطالعه می‌توان روند انتقال جرم و حرارت را متناسب با چروکیدگی و در اثر شرایط عملیات خشک‌کردن بررسی کرده و یک مدل پیشگویانه عددی برای آن تعریف کرد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه ابتدا سیب زرد لبنانی (Yellow delicious) از بازار محلی تهیه شد سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه خشک شدند. طی خشک‌کردن، تغییرات رطوبت، ضخامت و قطر آن‌ها ثبت و سپس رابطه بین متغیرها، توسط سیگماپلات به دست آمد. این رابطه خط‌ها برای شبیه‌سازی در کامسول مورد استفاده قرار گرفته و به عنوان تغییرات وابسته به زمان و دما در کامسول تعریف شدند. یک فایل کامسول با توجه به داده‌های آزمایشگاهی ساخته شد و خشک شدن یک نمونه آزمایشگاهی توسط کامسول شبیه‌سازی شد. بعد از اطمینان از همبستگی نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی و تأیید خروجی کامسول، تیمارهای مورد نظری که توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت طرح‌ریزی شده بودند، به ترتیب توسط کامسول شبیه‌سازی شده و خروجی‌های آن به عنوان پاسخ برای طرح مورد نظر ثبت شدند. سپس آنالیز واریانس جهت یافتن مدل ریاضیاتی برای هر پاسخ و بررسی فاکتورهای مؤثر بر هر پاسخ توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد.

محاسبه تغییرات رطوبت

سیب زرد از بازار محلی تهیه شد. سپس نمونه‌ها با ضخامت‌های ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر آماده‌سازی شدند. خشک‌کردن نمونه‌ها در آن کابینتی آزمایشگاهی با

یافتن معادلات خط مربوط به چروکیدگی از روش سطح پاسخ

داده‌های تجربی

طرح تیمارهای مورد نیاز توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ نسخه ۱۲، به روش سطح پاسخ به دست آمدند. فاکتورهایمانند دمای خشک‌کردن (A: ۴۰-۶۰ °C)، سرعت هوای خشک‌کردن (m/s) ۳-۷ mm) (B: ۰/۵-۲/۵، ضخامت اولیه نمونه‌ها (C: قطر اولیه نمونه‌ها (D: ۴-۶ cm) و زمان خشک‌کردن (E: ۶۰۰۰-۱۰۰۰۰ s) در این مرحله مورد بررسی قرار گرفتند. تیمارهای پیشنهادی نرم‌افزار دیزاین اکسپرت در جدول ۱ نشان داده می‌شوند. نتایج حاصل از این تیمارها نیز عبارت‌اند از وزن نمونه‌ها، ابعاد، و ضخامت.

سپس نمودارهای مربوط به کاهش وزن نمونه-زمان، کاهش وزن نمونه-تغییرات ضخامت، کاهش وزن نمونه-تغییرات قطر در نرم‌افزار سیگماپلات^۱ برای یافتن معادلات خطی و بررسی ضرایب رگرسیون مدل‌های برازش شده استفاده شد. در این مرحله مدل‌های ریاضیاتی مربوط به چروکیدگی بر حسب زمان عملیات و مقدار رطوبت از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمدند.

جدول ۱- تیمارها در روش سطح پاسخ

Table 1- Treatments in response surface methodology

شماره تیمار	درجه حرارت (درجه سلسیوس)	سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)	ضخامت اولیه (سانتی‌متر)	قطر اولیه (سانتی‌متر)	زمان (ثانیه)
Run Number	Temperature (°C)	Inlet air velocity (m/s)	Sample thickness (mm)	Sample diameter (cm)	Drying time (s)
1	60	2.5	0.3	5	6000
2	40	2.5	0.3	4	10000
3	50	0.5	0.3	4	6000
4	50	2.5	0.7	6	10000
5	60	2.5	0.7	4	8000
6	60	0.5	0.5	4	10000
7	40	0.5	0.7	5	10000
8	40	2.5	0.5	6	6000
9	40	1.5	0.7	4	6000
10	60	0.5	0.7	6	6000
11	50	1.5	0.5	5	8000
12	60	1.5	0.3	6	10000
13	40	0.5	0.3	6	8000

شبیه‌سازی در کامسول

در این مرحله تغییرات مش در ابعاد x ، y و z که برای تعیین میزان چروکیدگی تعریف شده بودند، بر اساس همین معادلات ریاضیاتی انجام شد. ویژگی‌های مورد نیاز در شبیه‌سازی از مطالعه یوان و همکاران (Yuan et al., 2019) به شرح جدول ۲ در نظر گرفته شدند.

ترکیب تیمارهای جدول ۱ که از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت در قالب طرح غربالگری سطح پاسخ به دست آمده بودند، در فایل‌های مجزا و با استفاده از مدل‌های ریاضیاتی مقدار رطوبتی و میزان چروکیدگی که در مرحله قبل به دست آمده بودند، در نرم‌افزار کامسول^۲ شبیه‌سازی شدند.

1- Sigmaplot
3- COMSOL

2- Design expert

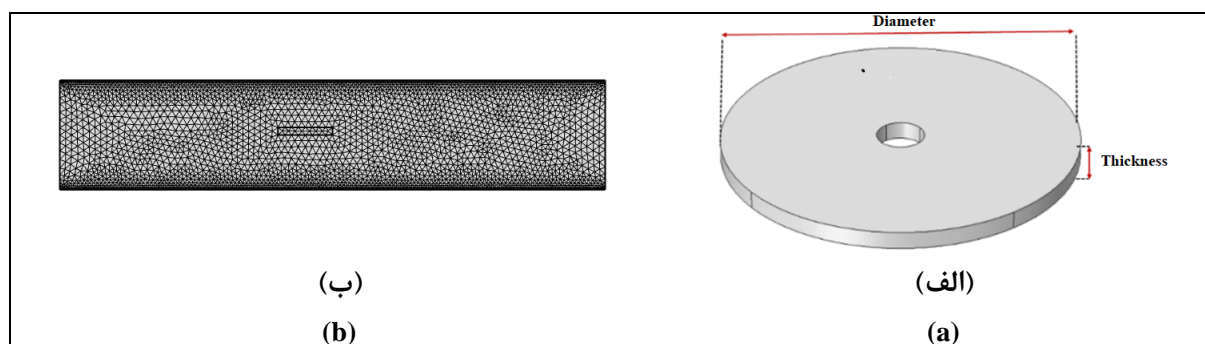
جدول ۲- ویژگی‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی خشک‌کردن سیب

Table 2- The characteristics used in the simulation of apple drying

مرجع Reference	مقدار Amount	ویژگی Characteristics
(Hussain <i>et al.</i> , 2021)	0.6	تخلخل Porosity
(Hussain <i>et al.</i> , 2021)	0.3860 (W/m.K)	هدایت حرارتی (k) Conductive heat transfer Coefficient
(Hussain <i>et al.</i> , 2021)	3850 (J/(kg.K)	ظرفیت گرمایی ویژه (c _p) Special heat coefficient
(Hussain <i>et al.</i> , 2021)	960 (kg/m ³)	دانسیته (ρ) Density
(Hussain <i>et al.</i> , 2021)	3.05×10 ⁻⁵ (m ² /s)	ضریب نفوذ (D _{ij}) Diffusion Coefficient

از داده‌های تجربی، برای نرم‌افزار تعریف شد. از تکنیک مش‌زنی با تعداد ۲۱۶۱۶ عنصر با کیفیت میانگین ۰/۸۳۶ برای انجام محاسبات استفاده شد. اساس این محاسبات، جریان هوای آرام با رطوبت بسیار کم، درون یک ماده متخلخل مرطوب مانند سیب است. هوا با رطوبت بسیار پایین در نظر گرفته شد. جریان، محیط غالب دربرگیرنده است و از سمت چپ سیستم شبیه‌سازی به سمت راست در حرکت است و معادلات ناویر-استوکس برای آن حل می‌شوند.

یک طرح دوبعدی از جفت‌کردن پدیده‌های سیالات، انتقال حرارت، و انتقال جرم گونه‌های رقیق (برای شبیه‌سازی انتقال جرم آب) در قالب یک رابطه ترکیبی از حالت پایا (برای حل معادلات جریان آرام در جابجایی هوا) و وابسته به زمان (برای حل معادلات انتقال حرارت، انتقال جرم و تغییرات مش) در زمان معین ۱۰ هزار ثانیه، استفاده شد. برای محاسبه و شبیه‌سازی چروکیدگی، از ماژول مش متحرک^۱ استفاده شد و میزان تغییرات مش در بعد ضخامت و قطر توسط معادلات ریاضی به دست آمده



شکل ۱- مدل شبیه‌سازی شده یک ورقه سیب (الف) و نمونه مش خشک‌کن (ب) در فضای شبیه‌سازی شده کامسول

Figure 1- The simulated apple slice (a) and the dryer meshing (b) in COMSOL simulation

مدل انتقال گرما

پس از قرار گرفتن ورقه‌های سیب در معرض هوای داغ داخل خشک‌کن، حرارت به صورت همرفتی به تمام سطوح نمونه‌ها انتقال می‌یابد. شدت انتقال حرارت سطح ورقه‌ها، توسط گرادیان دمایی بین دمای سطح و دمای هوای گرم و همچنین ضریب گرمای ویژه کنترل می‌شود. حرارت انتقالی از طریق همرفت از روش هدایتی به درون نمونه‌ها نفوذ می‌کند. از معادلات ۴ و ۵ به عنوان مدل انتقال گرما در برای شبیه‌سازی استفاده گردید.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (۴)$$

$$q = -k \nabla T \quad (۵)$$

که در آن،

ρ = دانسیته، C_p = گرمای ویژه در فشار ثابت، T = دما، t = زمان ($\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ تغییرات انرژی داخلی)، u = سرعت، q = بردار فلوکس حرارتی (قانون فوریه)، عبارت سمت چپ رابطه ۴ نشان دهنده انتقال حرارت ناشی از جابجایی توده سیال است.

مدل انتقال جرم

برای بررسی انتقال جرم هم در برگه‌های سیب و هم در هوای آن خشک‌کن، از معادلات ۶ و ۷ استفاده شد.

$$\nabla \cdot J_i + u \cdot \nabla c_i = R_i \quad (۶)$$

$$J_i = -D_i \nabla c_i \quad (۷)$$

که در آن،

J_i = شار جرمی آب، D_i = ضریب نفوذ آب، R_i = سرعت واکنش.

اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده عملیات

خشک‌کردن

نمودار داده‌های آزمایشگاهی در برابر داده‌های شبیه‌سازی شده، در اکسل رسم و میزان همبستگی داده‌ها بررسی شد (Abbasnia et al., 2021).

روش‌های آماری و یافتن بهترین مدل برازش شده

رسم نمودارها توسط نرم‌افزار اکسل و کامسول انجام شد. متغیرهای پاسخ با یک رابطه درجه دوم (رابطه ۸) برازش شدند که قادر به توصیف رابطه بین پاسخ‌ها و متغیرهای غیر وابسته بود (Abbasnia et al., 2021).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^2 \beta_{ij} X_{ij} \quad (۸)$$

که در آن،

Y = پاسخ، X_i و X_j = متغیرهای مستقلی که روی پاسخ اثر می‌گذارند و $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ = به ترتیب ضرایب رگرسیونی عبارات عرض از مبدا، خطی، درجه دوم و برهمکنش‌ها. صحت مدل و ضرایب رگرسیونی و معناداری آماری توسط آنالیز واریانس توسط ANOVA در دیزاین اکسپرت انجام شد. رابطه خط، ضرایب رگرسیونی و عدم برازش توسط پارامترهای آماری R^2 ، p -value (در سطح ۰/۰۵) بررسی شدند.

نتایج و بحث

یافتن مدل‌های تجربی برای نمونه‌های سیب

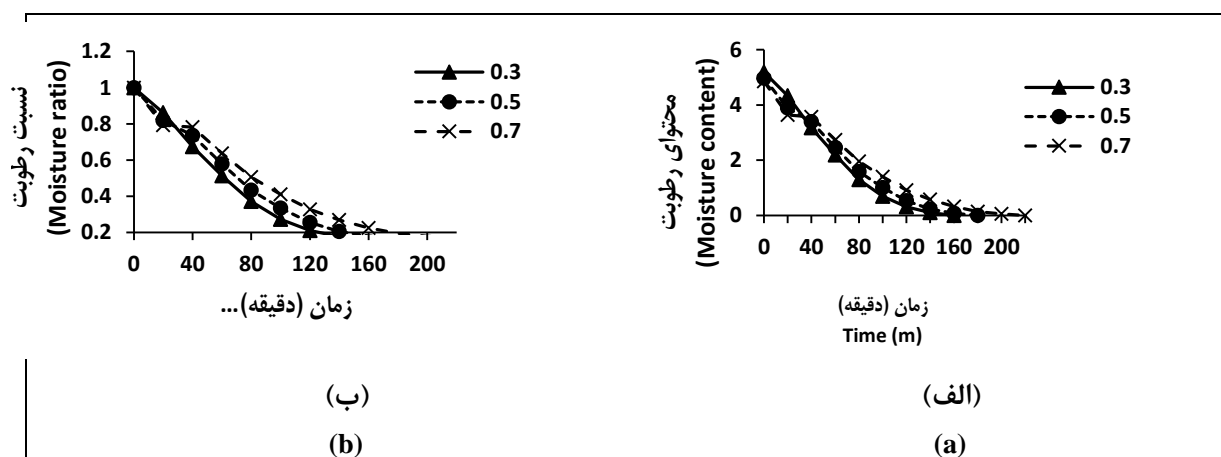
خشک شده

تغییرات نسبت رطوبتی، مقدار رطوبت، تغییرات

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ...

بیشتری جهت رسیدن به کمترین حد سرعت رطوبتی نیاز داشت. در حالی که این تفاوت بین نمونه با ضخامت ۰/۳ و ۰/۵ سانتی‌متر، ۲۰ دقیقه بود. شکل ۲ نشان‌دهنده آن است که ضخامت می‌تواند بر میزان مقدار رطوبت و زمان خشک‌کردن نمونه‌ها اثر گذاشته و نمونه با ضخامت کمتر در زمان کمتری خشک و به مقدار رطوبت حداقل رسیده است.

ضخامت و تغییرات قطر حاصل از داده‌های تجربی خشک‌کردن ورقه‌های سیب با ضخامت‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده می‌شوند. با توجه به شکل ۲ سرعت خشک‌کردن در نمونه با ضخامت ۰/۳ سانتی‌متر با سرعت بیشتری به حد ثابت رسیده است. در حالی که نمونه با ضخامت ۰/۷ سانتی‌متر به ۶۰ دقیقه زمان

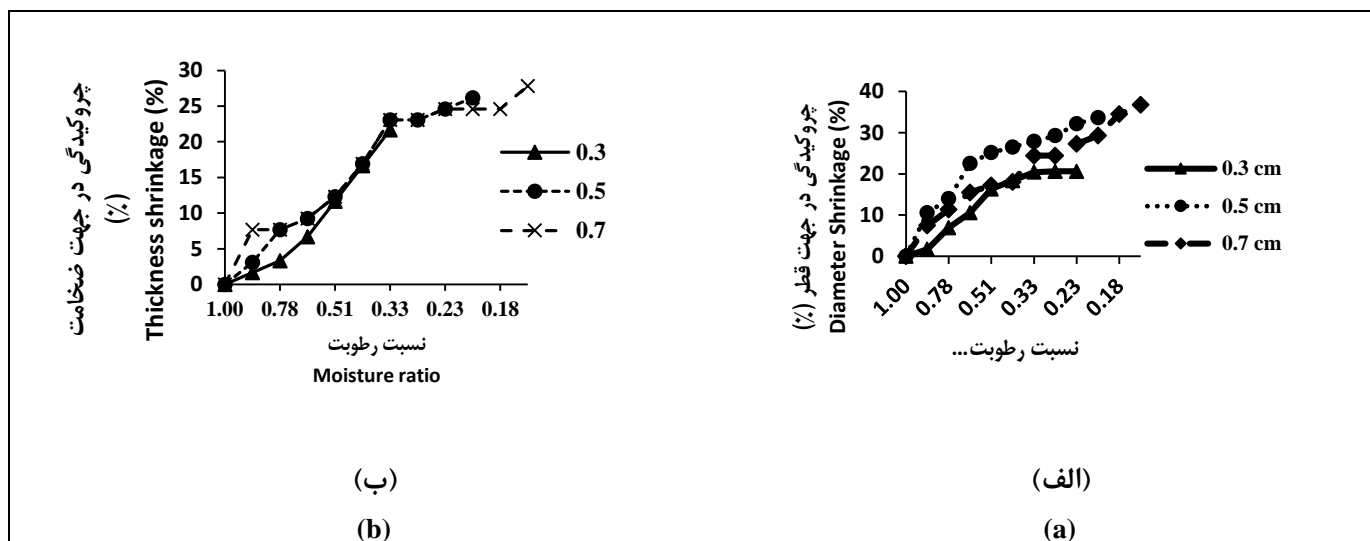


شکل ۲- تغییرات مقدار رطوبت (الف) و نسبت رطوبتی (ب) طی خشک‌کردن ورقه‌های سیب در آن آزمایشگاهی در دمای ثابت ۶۰ درجه سانتیگراد و جریان هوای با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه (مقادیر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ نشان دهنده ضخامت نمونه‌ها است).

Figure 2- Moisture content (a) and Moisture ratio (b) changes during apple drying in a lab oven with 60°C and 0.5 m/s (The 0.3, 0.5, and 0.7 refers to the thickness of samples.)

بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر خشک شده است و در نتیجه میزان چروکیدگی و کاهش ضخامت آن کمتر از دو نمونه دیگر است. در نمونه‌های با ضخامت ۰/۵ و ۰/۷، علیرغم تفاوت ۴۰ دقیقه‌ای در زمان خشک‌شدن نهایی، میزان تغییرات ضخامت به ترتیب ۲۶/۱ و ۲۷/۴٪ بوده است. ضمن اینکه از نرخ رطوبت ۰/۷۸ تا ۰/۲ که پایمان خشک‌شدن نمونه با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر بوده است، هر دو نمودار تغییرات ضخامت بر هم منطبق هستند.

شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات ضخامت بر حسب درصد (درصد چروکیدگی) متناسب با نسبت رطوبت است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه‌ها کاهش نرخ رطوبت باعث افزایش درصد چروکیدگی عرضی شده است. در نمونه با ضخامت ۰/۳ سانتی‌متر، از نرخ رطوبت ۰/۶۴ تا حدود ۰/۳، یک رابطه خطی بین درصد چروکیدگی و نرخ رطوبت مشاهده می‌شود. در این ضخامت، بیشترین میزان کاهش ضخامت، در حدود ۲۱/۶٪ است. با توجه به شکل ۲، نمونه با ضخامت ۰/۳ با سرعت



شکل ۳- تغییرات قطر (الف) و ضخامت (ب) ورقه‌های سیب طی خشک کردن در آون آزمایشگاهی در دمای ثابت ۶۰ درجه سانتیگراد و جریان هوای با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه (مقادیر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ نشان دهنده ضخامت نمونه‌ها است).

Figure 3- The shrinkage of Diameter (a) and thickness (b) of apple samples during drying at lab oven with 60°C and 0.5 m/s (The 0.3, 0.5, and 0.7 refers to the thickness of samples.)

افزایش ضخامت نمونه‌ها، در دمای ثابت خشک کردن، زمان رسیدن به کمترین مقدار رطوبت طولانی‌تر شد. به همین دلیل در این مطالعه به بررسی اثر سایر فاکتورها بر روند خشک کردن نمونه‌های سیب پرداخته شد. در رابطه ۱۱ مشخص شد مقدار رطوبت سیب طی خشک کردن تابع یک مدل خطی و تحت تأثیر فاکتورهای درجه حرارت هوای ورودی، سرعت هوای ورودی، ضخامت نمونه، قطر نمونه، زمان و برهمکنش درجه هوای ورودی با این فاکتورها است. با رسم جداگانه نمودارهای اشکال ۲ و ۳ در نرم افزار دیزاین اکسپرت، مدل‌های مربوط به نرخ رطوبت، مقدار رطوبت، چروکیدگی در ضخامت و چروکیدگی در قطر به شرح جدول ۳ استخراج شدند. این مدل‌ها بیشترین برآزش را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی از خود نشان دادند و به همین دلیل از آن‌ها به عنوان مدل‌های تجربی در شبیه‌سازی آتی توسط نرم افزار کامسول استفاده شد.

تغییرات قطر نمونه‌ها نسبت به تغییرات نرخ رطوبت طی خشک کردن در شکل ۳ نشان داده می‌شود. این تغییرات در نمونه با ضخامت ۰/۳، بعد از نرخ رطوبت ۰/۵۱ تقریباً به روند ثابتی تا انتهای خشک کردن رسیده است. در حالی که در هر دو نمونه با ضخامت‌های ۰/۵ و ۰/۷ تا انتهای عملیات خشک کردن روند افزایشی دارد. این روند افزایشی در نمونه با ضخامت ۰/۵ بیشتر از نمونه با ضخامت ۰/۷ بوده است. زیرا انتقال جرم از نمونه با ضخامت بیشتر، کندتر است. تغییرات مقدار رطوبت و نرخ رطوبت نسبت به زمان عملیات خشک کردن در نمونه‌های آزمایشگاهی سیب کاملاً مطابق با مطالعات خشک کردن انواع میوه‌جات در منابع دیگر است (شکل ۴ (ب) Białobrzewski, 2007; Golestani et al., 2013; Moreira et al., 2000; Nguyen et al., 2018; D. I. Onwude et al., 2018; Rafiee et al., 2010). در نمونه سیب، با

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ...

جدول ۳- مدل‌های تجربی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی خشک‌کردن سیب (x مقدار رطوبت است)

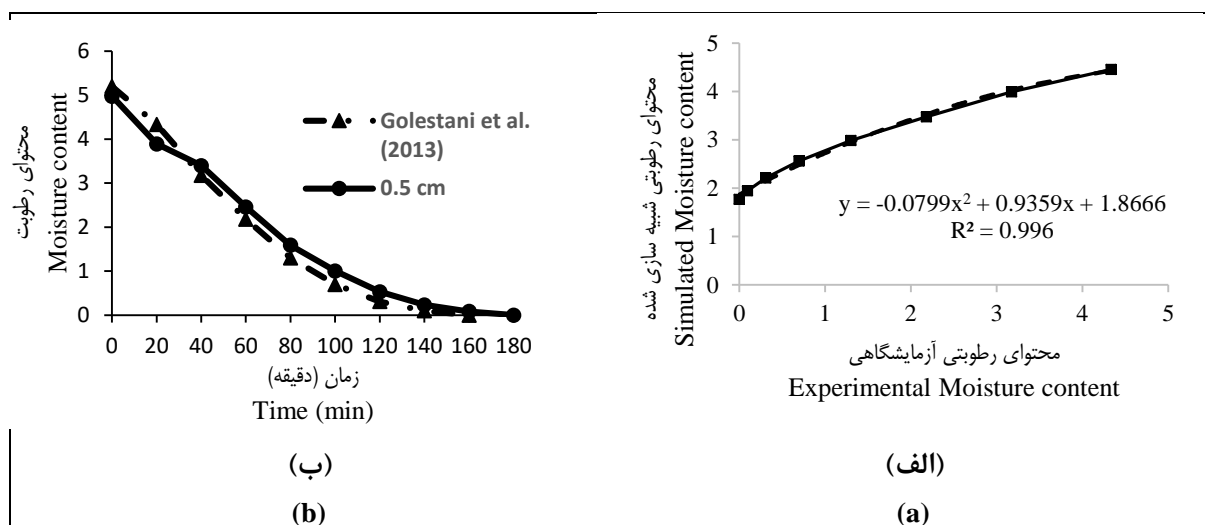
Table 3- Empirical models from experimental data of apple drying (x is moisture content)

R ²	رابطه Model	تابع Parameter	ضخامت (cm) Thickness (cm)
0.9968	$y = 1.2554 - 0.2384x + 0.0129x^2$	نرخ رطوبت (Moisture ratio)	0.3
0.9968	$y = 6.7802 - 1.4776x + 0.0799x^2$	مقدار رطوبت (Moisture content)	
0.9973	$y = -0.7143 + 0.1984x + 0.4356x^2$	چروکیدگی محوری (Thickness shrinkage)	
0.9775	$y = -7.6917 + 0.1984x - 0.3279x^2$	چروکیدگی شعاعی (Diameter shrinkage)	0.5
0.995	$y = 1.2005 - 0.1984x + 0.0094x^2$	نرخ رطوبت (Moisture rate)	
0.995	$y = 6.1741 - 1.1855x + 0.0562x^2$	مقدار رطوبت (Moisture content)	
0.9791	$y = -5.0513 + 8.0651x - 0.1224x^2$	چروکیدگی محوری (Thickness shrinkage)	0.7
0.9729	$y = -5.5829 + 8.0651x - 0.4311x^2$	چروکیدگی شعاعی (Diameter shrinkage)	
0.9905	$y = 1.1507 - 0.1621x + 0.0067x^2$	نرخ رطوبت (Moisture rate)	
0.9905	$y = 5.7365 - 0.949x + 0.039x^2$	مقدار رطوبت (Moisture content)	0.7
0.9578	$y = -3.7028 + 4.4666x - 0.1573x^2$	چروکیدگی محوری (Thickness shrinkage)	
0.9786	$y = -1.3904 + 4.0135x - 0.0772x^2$	چروکیدگی شعاعی (Diameter shrinkage)	

مشابه شرایط آزمایشگاهی، کار تغییرات پارامترهای نرم‌افزار و شرایط شبیه‌سازی ادامه داشت. سپس برای تأیید نهایی شبیه‌سازی، داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و نمودار میزان همبستگی آن‌ها به شرح شکل ۴ نمایش داده شد. میزان همبستگی در این نمودار ۰/۹۹۶ نشان داده می‌شود. این نشان‌دهنده شرایط درست شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول است. کار اصلی اجرای ۱۳ تیمار پیشنهادی روش سطح پاسخ مطابق با جدول ۱، در کامسول آغاز شد.

شبیه‌سازی تیمارهای استخراج شده از طرح روش پاسخ

در این مرحله قبل از اجرای تیمارهای طراحی شده توسط روش سطح پاسخ، یک نمونه شبیه‌سازی برای یک نمونه خشک‌شده در آزمایشگاه ایجاد شد. شرایط خشک‌شدن آزمایشگاهی مجدداً در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد و مدل‌های تجربی‌ای که از داده‌های آزمایشگاهی خشک‌کردن سیب در جدول ۳ به دست آمده بودند، در این شبیه‌سازی اولیه مورد استفاده قرار گرفت. تا زمان رسیدن به مقدار رطوبت



شکل ۴- نمودار همبستگی بین داده‌های مقدار رطوبت آزمایشگاهی با داده‌های (الف) شبیه‌سازی شده و (ب) رفرنس گلستانی و همکاران (۲۰۱۳)

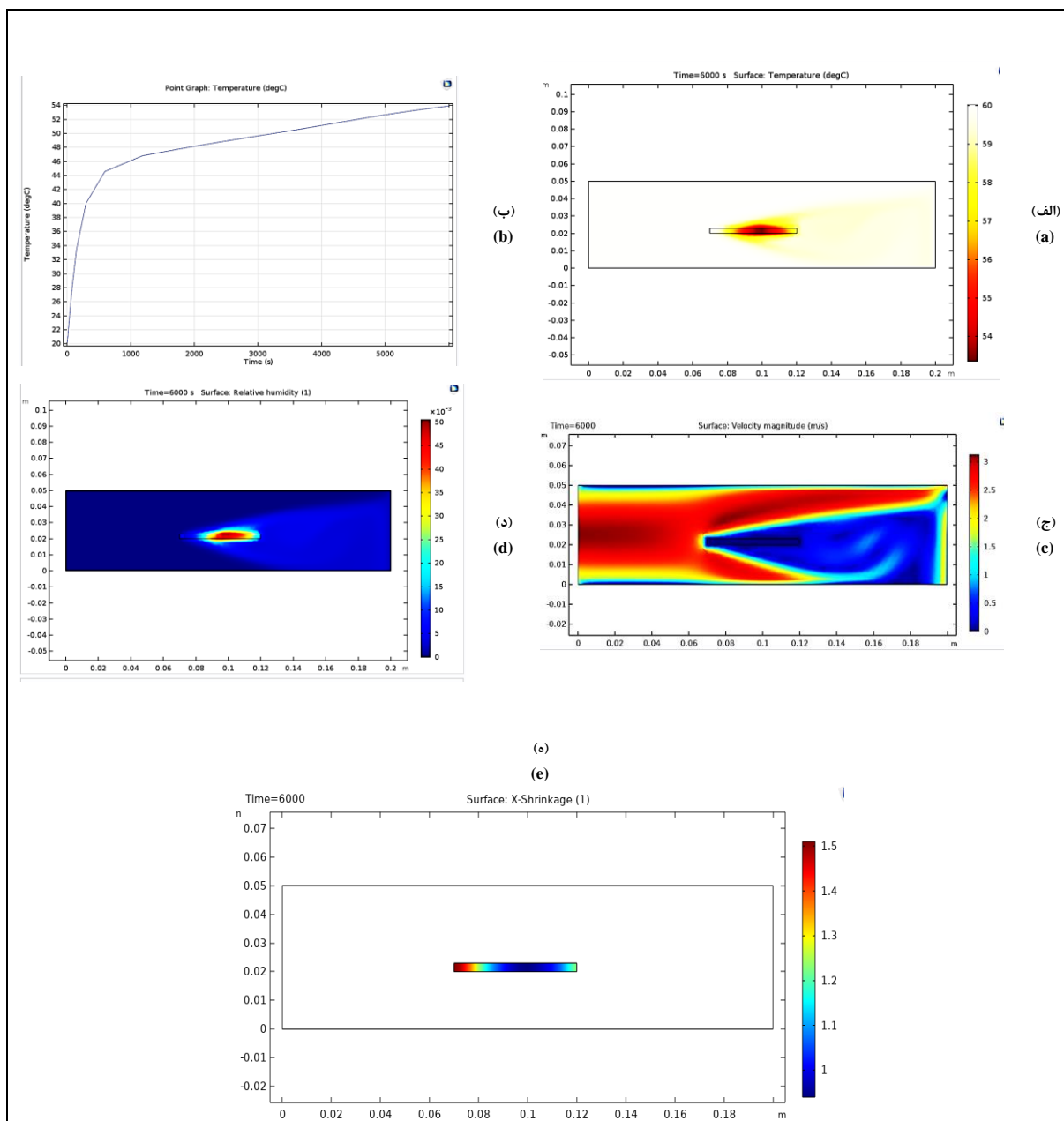
Figure 4- Correlation between moisture content experimental data with (a) simulated and (b) Golestani et al. (2013) data

۴۴ درجه سلسیوس به سرعت افزایش یافته و بعد با شیب ملایمی تا انتهای زمان خشک کردن به ۵۴ درجه سلسیوس رسیده است. این در حالی است که در نمونه شماره ۲، دما ابتدا تا ۳۴ درجه سلسیوس افزایش یافته و سپس به دمای نهایی ۳۹ درجه سلسیوس رسیده است. در تیمارهای ۳ و ۴، به دلیل یکسان بودن دمای هوای ورودی در هر دو حالت، تغییرات سرعت هوا، قطر، ضخامت و زمان خشک کردن، روی دمای متوسط نمونه‌ها اثری نداشته و هر دو نمونه دمای نزدیک به ۴۲ درجه سلسیوس را نشان می‌دهند. این تشابه دمای نهایی در تیمارهایی که دمای ورودی هوا در آن‌ها یکسان است نیز مشاهده می‌شود. اما در مقایسه با تیمارهای ۱ و ۲، و یا سایر تیمارهایی که تفاوت دمایی در بین آن‌ها وجود دارد، نشان می‌دهد دمای هوای ورودی بر دمای متوسط نمونه‌ها اثر می‌گذارد.

بعد از اجرای ۱۳ تیمار پیشنهادی روش سطح پاسخ در جدول ۱ و بر اساس فاکتورهای دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی، ضخامت نمونه‌ها و زمان خشک کردن، نتایج شبیه‌سازی شده خشک کردن سیب به شرح اشکال ۵ تا ۷ نشان داده می‌شود. شکل ۵ توزیع دما (الف و ب)، سرعت هوا (ج)، توزیع رطوبت (د) و چروکیدگی نهایی (ه) شبیه‌سازی شده برای تیمار شماره یک را نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در تمامی نمونه‌ها آن بود که دمای نمونه در ابتدای عملیات با سرعت افزایش می‌یابد و بعد به صورت تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این نتیجه با نتایج آپراچیتا و همکاران (Aprajeeta et al., 2015) هماهنگی دارد.

در تیمارهای ۱ و ۲ اثر تغییرات دمای اولیه، قطر و زمان خشک کردن بر روی دمای متوسط نمونه‌ها کاملاً مشهود است. به طوری که در نمونه یک دما تا

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ...



شکل ۵- نمونه توزیع دما (الف و ب)، سرعت هوا (ج)، توزیع رطوبت (د) و چروکیدگی نهایی (ه) شبیه‌سازی شده برای تیمار شماره یک
 Figure 5- temperature distribution (a and b), air velocity (d), moisture distribution (d), and final shrinkage (e) of treatment number 1

ابتدای عملیات بسیار سریع بوده و بعد به آرامی افزایش یافته و به حد تقریباً ثابتی رسیده است. آپراجیتا و همکاران (Aprajeta *et al.*, 2015) معتقد بودند این روند تغییرات دمایی در درون نمونه به دلیل افزایش تدریجی ضخامت لایه خشک‌شده‌ای از نمونه است که حرارت از طریق آن منتقل می‌شود.

بر این اساس روش سطح پاسخ به خوبی نشان داده است که ترکیب فاکتورهای مورد مطالعه در نهایت منجر به این شد که فاکتورهای درجه حرارت، ضخامت نمونه و سرعت هوای ورودی روی دمای متوسط نمونه‌ها اثرگذار است. آنچه در تمامی تیمارها دیده می‌شود، آن است که افزایش دما در

پیش‌بینی مقدار رطوبت نهایی دست پیدا کردند. مدلی که برای مقدار رطوبت نمونه‌ها در این مطالعه به دست آمد، بسیار مشابه مطالعه سنديرا و همکاران (W. Senadeera et al., 2020) بود که بر روی خشک کردن خرما لوانجام داده بودند. این نشان می‌دهد مدل‌سازی خشک کردن سیب به خوبی قادر به پیش‌گویی شرایط خشک کردن بوده است.

مدل‌سازی فاکتورهای مؤثر بر عملیات خشک کردن توسط روش سطح پاسخ برای سیب

بعد از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، داده‌های مربوط به دمای متوسط نمونه‌ها، مقدار رطوبت، نرخ رطوبت، میزان چروکیدگی ضخامت و قطر استخراج شدند.

دمای متوسط نمونه

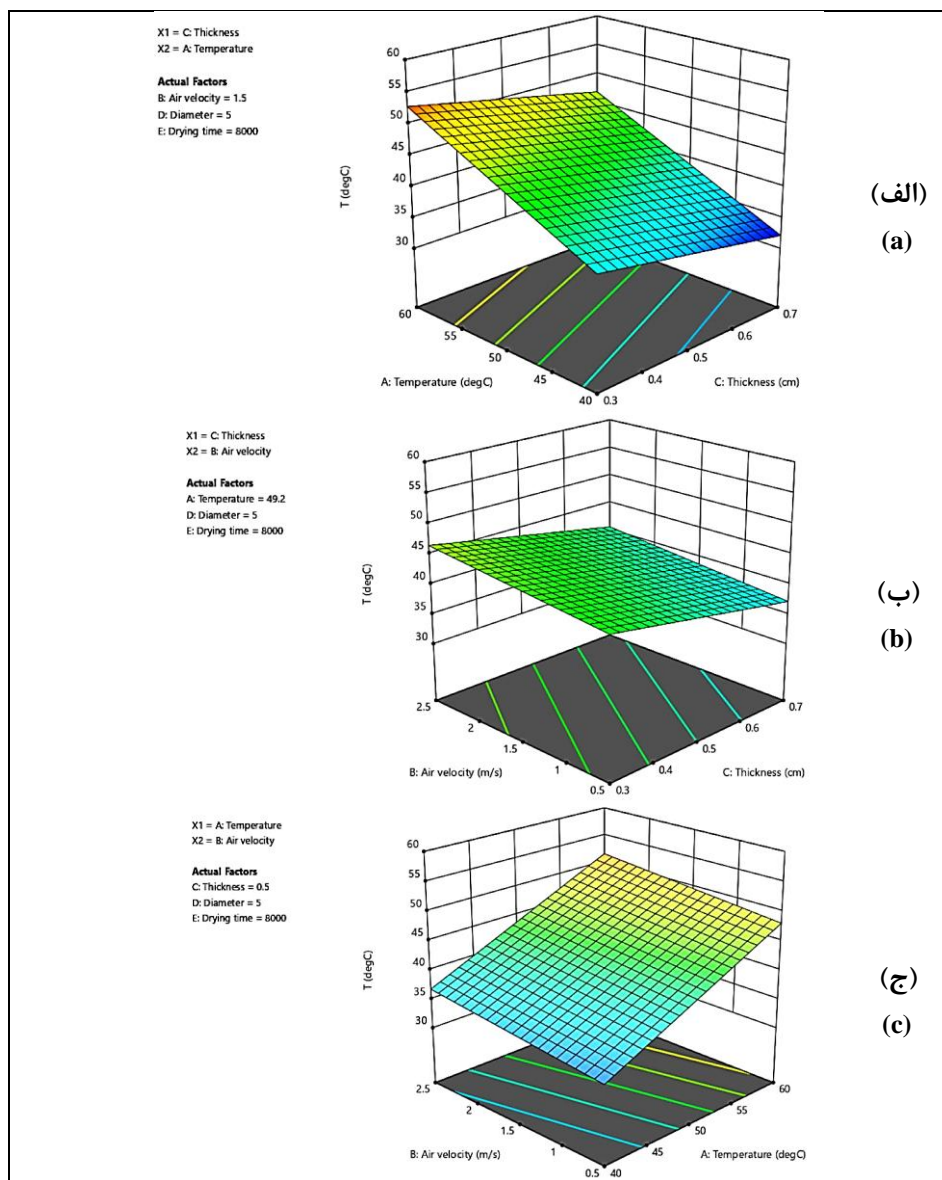
طبق جدول آنالیز واریانس پارامترهای مؤثر بر مدل دمای متوسط نمونه، مشخص شد که مدل خطی پیشنهاد شده توسط طرح، معنی‌دار بوده و سه فاکتور درجه حرارت خشک‌کن، سرعت هوای ورودی و ضخامت نمونه روی دمای متوسط نمونه‌ها اثر معنی‌دار دارد. بر این اساس رابطه ۹ به عنوان مدل پیشنهاد شد. همچنین شکل ۶ اثر سه فاکتور دما، سرعت هوا، و ضخامت بر روی دمای متوسطی نمونه سیب را به صورت سطح پاسخ نشان می‌دهد.

$$R^2 = 0.9983 \quad (9)$$

$$C - 2.94 - 1.74A + 7.40B + 42.47C = \text{دمای متوسط نمونه}$$

آن‌ها این تدریجی بودن افزایش ضخامت را ناشی از حذف تدریجی رطوبت از نمونه می‌دانستند. آن‌ها معتقد بودند این رفتار طی خشک شدن نمونه زمانی رخ می‌دهد که عملیات خشک کردن توسط توزیع رطوبت کنترل می‌شود (Aprajeeta et al., 2015). آپراچیتا و همکاران (Aprajeeta et al., 2015) طی خشک کردن سیب‌زمینی و شبیه‌سازی آن توسط کامسول دریافتند که زمانی که ماتریکس نمونه توسط آب اشباع می‌شود، حذف رطوبت با نرخ سریعتری رخ می‌دهد. با پیشرفت عملیات خشک کردن، غلظت آب کاهش یافته و شیب پروفایل رطوبت در مراحل انتهایی خشک کردن کاهش می‌یابد. این نتیجه با توجه به شکل ۲ که به ترتیب مقدار رطوبت نمونه‌های سیب با سه ضخامت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ سانتی‌متر را نشان می‌دهند، همخوانی دارد. آن‌ها علت این اتفاق را تغییر ضریب نفوذ مؤثر نمونه می‌دانستند که قویاً به تخلخل و مسیر توزیع مولکولی وابسته است. در انتهای عملیات خشک کردن توزیع مولکولی به دلیل فاکتور تورئوسیتی کاهش می‌یابد. اما آنچه در پاسخ‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۵ جالب توجه است، آن است که توزیع رطوبتی در بین نمونه‌ها کاملاً متفاوت بوده و می‌تواند تابعی از ضخامت نمونه‌ها، ضریب نفوذ متفاوت بین نمونه‌های سیب و سایر فاکتورهای خشک کردن باشد (Aprajeeta et al., 2015). پرادو و همکاران (Prado et al., 2000) نیز طی خشک کردن خرما به یک مدل ریاضی برای

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ...



شکل ۶- اثر فاکتورهای معنی‌دار مدل بر دمای متوسط نمونه‌های سیب
Figure 6- The effect of significant factors on central temperature of apple samples

۷ اثر فاکتور زمان بر میزان مقدار رطوبت نمونه‌های سیب را نشان می‌دهد.

$$R^2 = 0.9998 \quad (10)$$

$$\text{مقدار رطوبت} = 0.1 - 0.0594 A + 0.0580$$

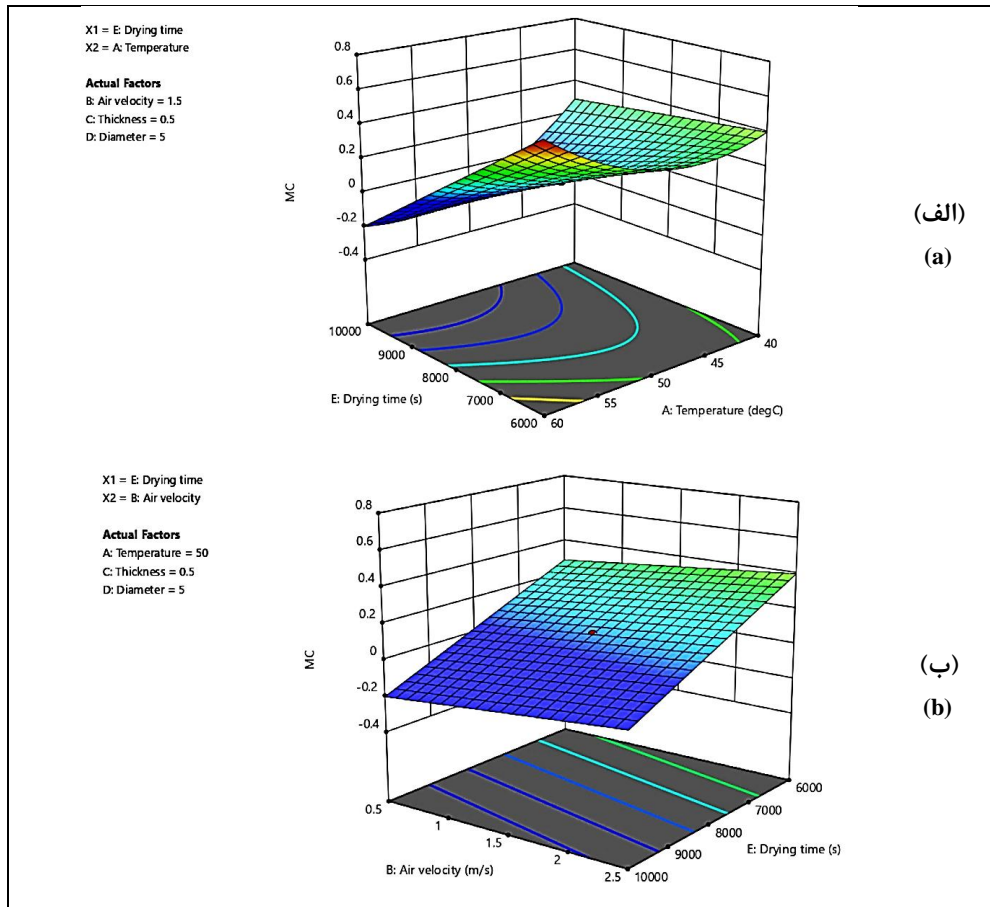
$$B - 0.0602 C - 0.0602 D$$

$$A^2 + 0.11872 BC + 0.2450 AE - 0.11848$$

$$AD - 0.0610 AC - 0.3076 AB - 0.11856 E - 0.2424$$

مقدار رطوبت

طبق آنالیز آماری، فاکتورهای درجه هوای ورودی، سرعت هوا، ضخامت نمونه، قطر نمونه و زمان خشک‌کردن، بعلاوه اثرات متقابل درجه حرارت با سایر فاکتورها اثر معنی‌داری بر مقدار رطوبت دارند. به این ترتیب مدل آن به شکل رابطه ۱۰ در قالب یک رابطه لگاریتم طبیعی، به دست آمد. شکل



شکل ۷- اثر فاکتورهای معنی دار مدل بر مقدار رطوبت نمونه‌های سیب
Figure 7- The effect of significant factors on moisture content of apple samples

نسبت رطوبت

طبق بررسی واریانس مدل و فاکتورهای مؤثر بر نسبت رطوبت در جدول آنالیز واریانس، مشخص شد که یک مدل خطی با فاکتور زمان خشک کردن قادر به پیشگویی نرخ رطوبت خواهد بود. به این ترتیب مدل طبق رابطه ۱۱ نوشته

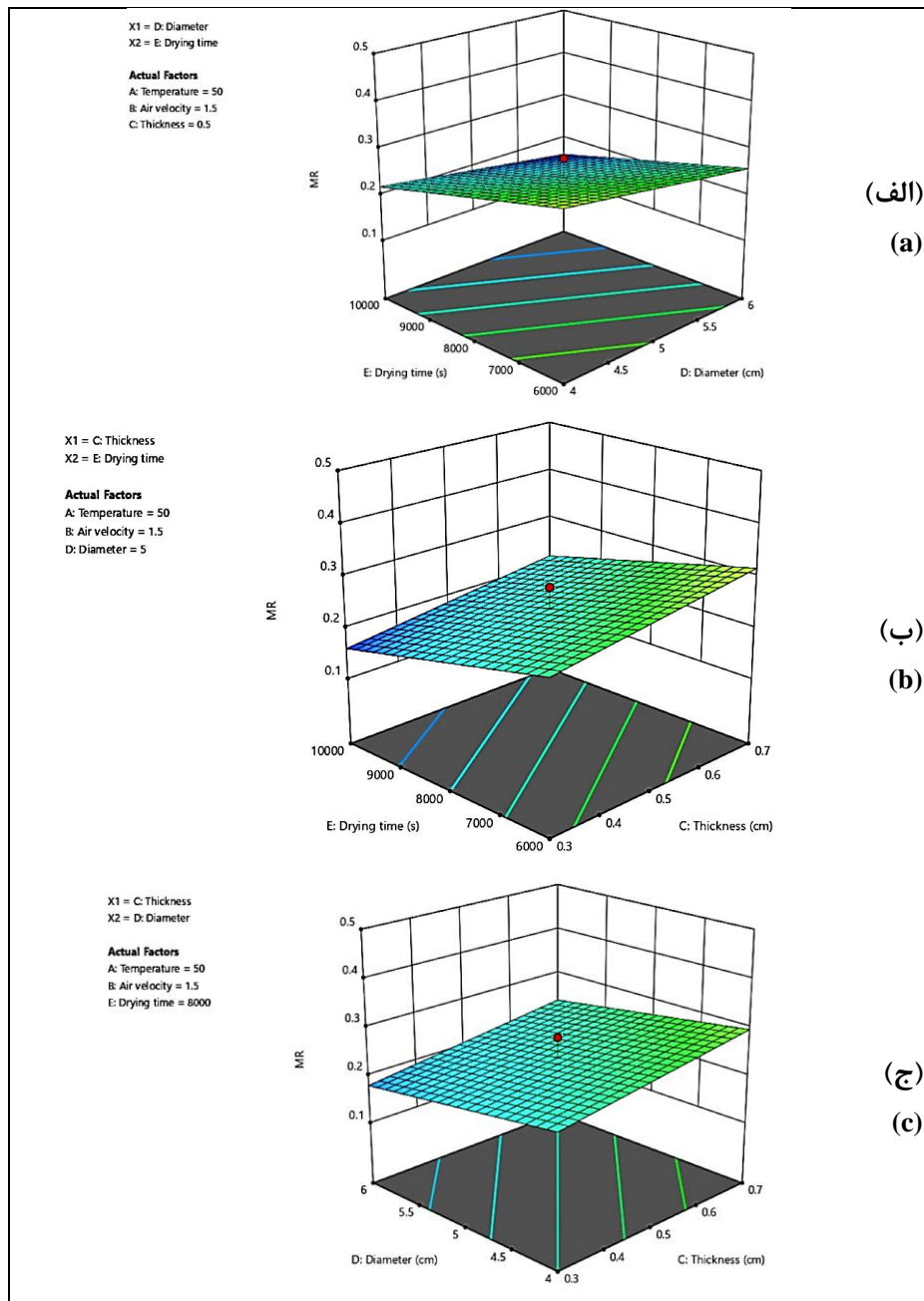
شد.

$$R^2 = 0.7713 \quad (11)$$

$$\text{نرخ رطوبت} = 0.2382 - 0.0492 E$$

شکل ۸ نیز نشان‌دهنده سطح پاسخ تأثیر فاکتورهای مؤثر بر نرخ رطوبت است.

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ...



شکل ۸- اثر فاکتورهای معنی‌دار مدل بر نرخ رطوبت نمونه‌های سیب
Figure 8- The effect of significant factors on moisture rate of apple samples

قادر به پیشگویی صحیح میزان چروکیدگی نهایی نمونه‌ها است. به این ترتیب رابطه ۱۲ به دست آمد.

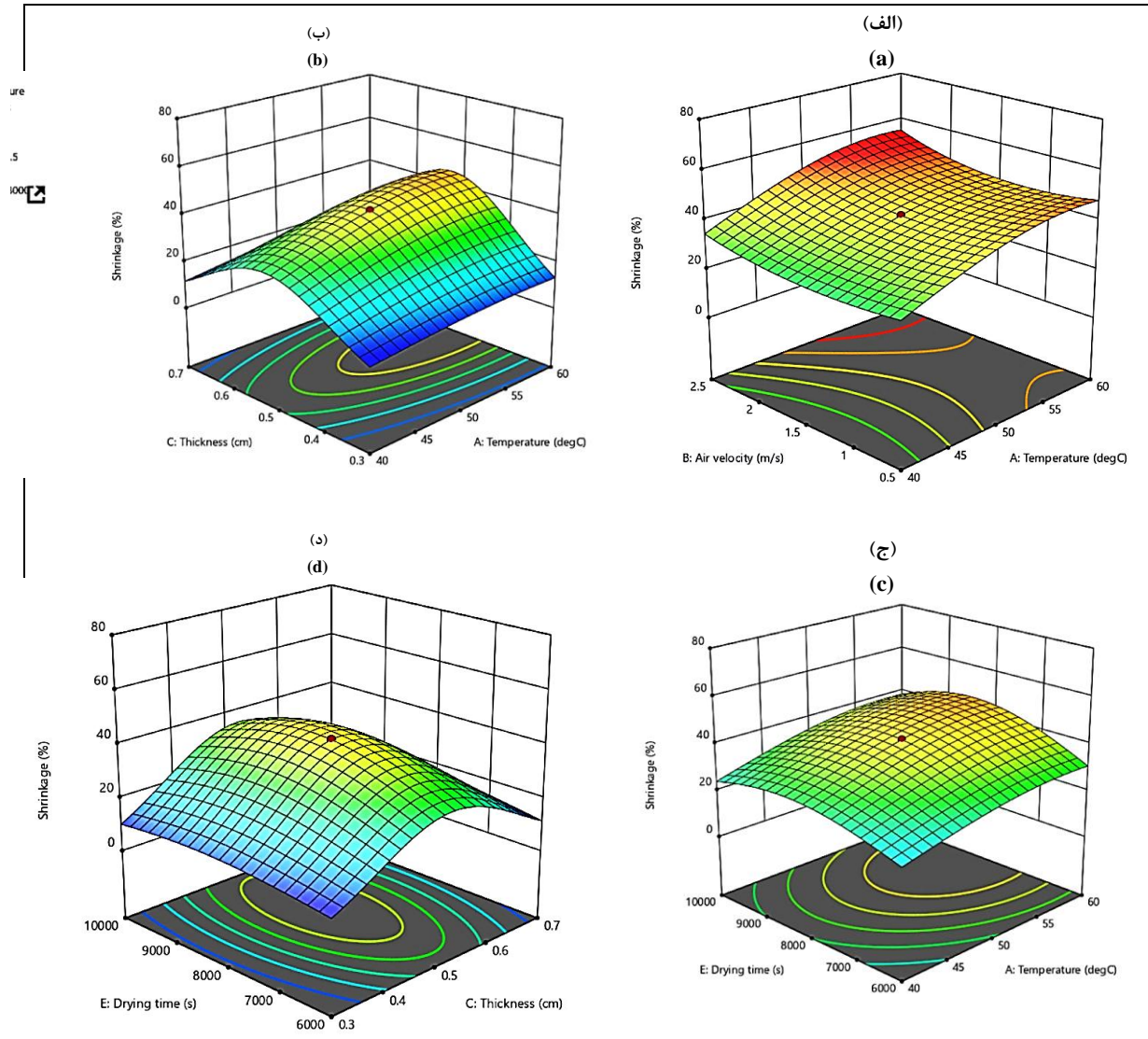
$$E^2 - 7/15 \times 10^{-4} C^2 - 26/84 C 27/7 + A = 3/73 + 0/171 \ln \quad (12)$$

درصد چروکیدگی

میزان چروکیدگی نهایی نمونه‌های سیب با توجه به روش سطح پاسخ مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفت. مشخص شد یک مدل لگاریتم طبیعی با فاکتورهای مؤثر درجه حرارت عملیات، ضخامت نمونه، مجذور ضخامت نمونه و زمان خشک کردن

پیروی می‌کند. شکل ۹ نشان‌دهنده اثر فاکتورهای معنی‌دار بر روی پاسخ چروکیدگی کل نمونه‌های سیب طی خشک‌کردن است.

آپراجیتا و همکاران (Aprajeeta *et al.*, 2015) با شبیه‌سازی چروکیدگی ورقه‌های سیب‌زمینی در کامسول، دریافتند چروکیدگی از یک مدل خطی



شکل ۹- اثر فاکتورهای معنی‌دار مدل بر چروکیدگی نهایی نمونه‌های سیب
Figure 9- The effect of significant factors on total shrinkage of apple samples

چروکیدگی سیب تابع فاکتورهای دمای هوای ورودی به خشک‌کن، ضخامت، مجذور زمان و مجذور ضخامت است. این نشان می‌دهد در زمان خشک‌کردن این میوه، کنترل بهینه زمان عملیات و ضخامت نسبت به سایر فاکتورها اثر معنادارتری بر

طبق رابطه ۱۲، چروکیدگی در سیب از یک رابطه لگاریتم طبیعی پیروی می‌کند این رابطه خطی از توضیحات آپراجیتا و همکاران (Aprajeeta *et al.*, 2015) درباره رابطه چروکیدگی سیب‌زمینی پیروی می‌کند. طبق نتایج روش سطح پاسخ،

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان دادند که جهت به حداقل رساندن میزان چروکیدگی و سرعت بخشیدن به عملیات خشک‌کردن، فاکتورهای ضخامت نمونه و زمان فرآوری اثر معناداری طی عملیات داشته و باید طی خشک‌کردن به این دو فاکتور توجه کرد. همچنین با پیشرفت چروکیدگی، میزان تغییرات دمایی درون نمونه کاهش می‌یابد. در ابتدای خشک‌کردن که چروکیدگی در کمترین میزان خود است، افزایش دمای متوسط نمونه قابل توجه و سریعتر است و با پیشرفت عملیات و افزایش میزان چروکیدگی، روند افزایش دما کندتر و در مراحل انتهایی ثابت می‌شود. این موضوع از نظر مباحث مربوط به انتقال حرارت و جرم قابل توجه است. همچنین با کمک مدل‌سازی توسط روش سطح پاسخ، معادلاتی با بیشترین ضریب همبستگی برای مدل‌سازی دمای متوسط نمونه، مقدار رطوبت، نرخ رطوبت و به ویژه میزان چروکیدگی نمونه‌ها معین شدند. این معادلات قادر بودند با ضریب همبستگی بالایی پاسخ‌های مدنظر را پیش‌گویی کنند.

چروکیدگی دارد. این نتایج مشابه مطالعات انوود و همکاران (D. I. Onwude *et al.*, 2018) است. آن‌ها به یک رابطه خطی بین رطوبت بدون بعد و چروکیدگی حجمی و مساحت سطحی خطی دست یافتند و همچنین بیان کردند میزان چروکیدگی تحت تأثیر مقدار ضخامت نمونه، دمای خشک‌کردن، و زمان خشک‌کردن است. آرال و بسه (Aral & Bese, 2016) نیز یک رابطه خطی بین افزایش دما و سرعت هوای خشک‌کردن، در میزان چروکیدگی میوه زالزالک یافتند که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. همچنین مطالعه گلستانی و همکاران (Golestani *et al.*, 2013) نشان داد یک مدل ریاضی قادر به توصیف سینتیک خشک‌کردن نمونه‌های سیب است. نتایج آن‌ها همانند نتایج این مطالعه نشان داد که میزان چروکیدگی نمونه وابسته به رطوبت و دمای آن است. آن‌ها در این مطالعه از دیسک‌های سیب و دمای خشک‌کردن ۸۰-۶۰ درجه سانتیگراد استفاده کردند. رفیعی و همکاران (Rafiee *et al.*, 2010) نیز دریافته‌اند که با افزایش دما و سرعت هوای خشک‌کردن، توزیع مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد ولی ضخامت نمونه اثری بر آن ندارد.

قدردانی

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بابت تأمین هزینه‌های مالی انجام طرح در قالب قرارداد به شماره ۱۴-۱۳۹۹-۰۲ سپاسگزاری می‌شود.

تعارض منافع

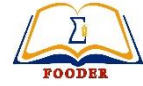
نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Abbasnia, A., Jafari, M., and Rohani, A. 2021. A novel method for estimation of stress concentration factor of central cutouts located in orthotropic plate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 43(7): 348.
- Aprajeeta, J., Gopirajah, R., and Anandharamkrishnan, C. 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*. 144, 119-128.
- Aral, S., and Bese, A. V. 2016. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210, 577-584.
- Białobrzewski, I. 2007. Simultaneous heat and mass transfer in shrinkable apple slab during drying. *Drying Technology*. 24(5): 551-559.
- Brasiello, A., Adiletta, G., Russo, P., Crescitelli, S., Albanese, D., and Di Matteo, M. 2013. Mathematical modeling of eggplant drying: shrinkage effect. *Journal of Food Engineering*. 114(1): 99-105.
- Curcio, S., and Aversa, M. 2014. Influence of shrinkage on convective drying of fresh vegetables: A theoretical model. *Journal of Food Engineering*. 123, 36-49.
- Golestani, R., Raisi, A., and Aroujalian, A. 2013. Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient. *Drying Technology*. 31(1): 40-51.
- Hussain, T., Kamal, M. A., and Hafiz, A. 2021. Comparative analysis of apple and orange during forced convection cooling: experimental and numerical investigation. *AIMS Energy*. 9(2) : 193-212.
- Kurozawa, L. E., Hubinger, M. D., and Park, K. J. 2012. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*. 108(1): 43-50.
- 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.
- Nguyen, T. K., Khalloufi, S., Mondor, M., and Ratti, C. 2018. Shrinkage and porosity evolution during air-drying of non-cellular food systems: Experimental data versus mathematical modelling. *Food Research International*. 103, 215-225.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., and Chen, G. 2018. The potential of computer vision, optical backscattering parameters and artificial neural network modelling in monitoring the shrinkage of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 98(4): 1310-1324.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., and Chen, G. 2018. The potential of computer vision, optical backscattering parameters and artificial neural network modelling in monitoring the shrinkage of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 98(4): 1310-1324.
- Prado, M. E. T., Alonso, L. F. T., and Park, K. J. 2000. Shrinkage of Dates (*Phoenix Dactylifera* L.) during Drying. *Drying Technology*. 18(1-2): 295-310.
- Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S. S., and Mobli, H. 2010. Modeling effective moisture diffusivity of orange slice (*Thompson* Cv.). *International Journal of Food Properties*. 13(1): 32-40.
- Senadeera, W., Adiletta, G., Önal, B., Di Matteo, M., and Russo, P. 2020. Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods*. 9(1): 101.

شبیه‌سازی عددی با کامسول و مدل‌سازی با روش سطح پاسخ...

Yuan, Y., Tan, L., Xu, Y., Yuan, Y., and Dong, J. 2019. Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer. International Journal of Thermal Sciences, 136, 539-548.



Original Research

Numerical Simulation with Comsol and Modeling with Response Surface Method of the Effect of Drying Factors on Dried Apple Shrinkage

S. J. Hashemi* and A. Ranjbar Nedamani

* Corresponding Author: Associate Professor, Biosystem Engineering Department, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran. Email: szhash@yahoo.com

Received: 26 August 2021, Accepted: 23 January 2023

<http://doi: 10.22092/fooder.2023.355666.1311>

Abstract

This study aimed to combine the response surface methodology and COMSOL simulation to reduce the number of studied treatments, find the effective factors and their interactions and also the prediction model for final dried orange characteristics, and find the shrinkage model of apple fruit concerning the studied drying process factors. A definitive screen design of response surface methodology was designed by Design-Expert software. Factors such as drying time (A: 20-60 °C), air velocity (B: 0.5-2.5 m/s), sample thickness (C: 3-7 mm), sample diameter (D: 4-6 cm), and drying time (E: 6000-10000s) were investigated. These treatments were simulated in COMSOL software 5.3a. After finding the treatments in Design Expert software, the simulation starts. Results show apple samples results show, that the air temperature and its interaction with other investigated factors, the sample thickness, and the air velocity are effective on the central temperature of the sample. The moisture rate and moisture content are depending on drying time. Apple shrinkage is a logarithmic model as a function of air temperature, sample thickness, and process time. Apple shrinkage during drying significantly affects the thickness of samples. To control the shrinkage rate during apple drying, controlling the time of process and sample thickness is more effective than other processing factors. This leads to a prediction model for drying apples and process control. The optimization is shown the minimum shrinkage is at 0.7mm thickness, 5.45cm diameter, and 9938s process time.

Keywords: Shrinkage, Apple drying, Modeling, Response surface, Simulation