



DOI: 10.22034/FR.2021.44011.1785

تأثیر سرعت هوای داغ بر سینتیک خشک شدن و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی پودر میوه تمشک تولید شده به روش فوم‌مت

مهسا ارشادفرکار^۱، سعید داداشی^{۲*}، جلال دهقان نیا^۲ و مریم خاکباز حشمتی^۲

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲ به ترتیب استادیار، استاد و استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: Email: Dadashis@tabrizu.ac.ir

چکیده

زمینه مطالعاتی: در مطالعه حاضر سینتیک خشک شدن تمشک به روش فوم‌مت و خواص فیزیکی شیمیایی پودر حاصله، تحت تأثیر سرعت هوا مورد بررسی قرار گرفت. روش کار: برای تهیه فوم از *اوالنومین* و *متیل سلولوز* هر کدام با غلظت ۰/۵٪ به ترتیب به عنوان عامل فوم‌ساز و عامل پایدارکننده فوم استفاده شد. فوم تهیه شده در ضخامت ۷ میلی‌متر بر روی پلیت آلومینیومی گسترده شده و در یک خشک‌کن کابینتی با هوای داغ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های ۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه خشک گردید. نتایج: نتایج نشان داد که ضریب انتشار مؤثر رطوبت در بازه $10^{-8} \times 1/391$ تا $10^{-8} \times 1/723$ متر مربع بر ثانیه بود و افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه و ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، تأثیر معنی‌داری بر آن داشت ($p < 0/05$). با این حال، افزایش سرعت هوای خشک کردن بر محتوای رطوبت، نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن محصول در حین خشک شدن، تأثیر معنی‌داری نداشت ($p > 0/05$). تغییرات شاخص کار و نسبت هوسنر در سرعت‌های مختلف خشک کردن از لحاظ آماری معنی‌دار بود ($p < 0/05$) و افزایش سرعت هوا از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه، سبب کاهش مقادیر آن‌ها گردید که نشانگر بهبود جریان پذیری پودر در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه بود. همچنین، مقادیر میانگین محتوای رطوبت پودر، شاخص حالیت در آب، شاخص جذب آب، شاخص کروما و میزان روشنایی پودر تمشک، با افزایش سرعت هوای خشک کردن به طور معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0/05$). در صورتیکه، دانسیته توده‌ای، ضربه‌ای و ذره‌ای و اختلاف رنگ کلی پودر تمشک، با افزایش سرعت هوای خشک کردن کاهش یافت ($p > 0/05$). نتیجه‌گیری نهایی: پودر تمشک تولید شده در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه، به دلیل دارا بودن شاخص جذب آب بیشتر و جریان‌پذیری بالاتر، می‌تواند به عنوان افزودنی طبیعی در محصولات لبنی، دسر، مربا، ژله و سایر محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: پودر تمشک، خشک کردن فوم‌مت، خواص عملکردی، سینتیک خشک شدن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت

مقدمه

میوه تمشک (*Rubus idaeus*) با توجه به فراوانی ترکیبات زیست فعال در آن و پتانسیل بالای این ترکیبات در بهبود سلامتی و همچنین دارا بودن عطر و طعم و رنگ عالی، بسیار مورد توجه بوده و یک محصول ارزشمند و منحصر به فرد محسوب می‌شود (سی و همکاران ۲۰۱۶). ترکیبات فیتوکیماکال موجود در تمشک، نظیر آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها و الاجیک اسیدها، نقش مهمی در فعالیت آنتی اکسیدانی (رائو و اسنایدر ۲۰۱۰)، اثر بازدارندگی بر سرطان، چاقی، انحطاط عصبی و سایر بیماری‌ها ایفا می‌کنند (موریموتو و همکاران ۲۰۰۵؛ سیرام و همکاران ۲۰۰۶). با این حال، میوه تمشک به دلیل داشتن محتوای رطوبت بالا و بافت آسیب پذیر، بسیار سریع فاسد شده و نگهداری آن به صورت تازه حتی تحت شرایط سردخانه‌ای نیز دشوار می‌باشد. از این رو، حفظ کیفیت میوه تمشک پس از برداشت و همچنین افزایش مدت زمان نگهداری آن، یکی از اهداف پرورش‌دهندگان تمشک در سراسر جهان است (پالونن و وبر ۲۰۱۹). در حال حاضر، عمده محصولات در صنعت تمشک به شکل میوه‌های یخ زده، آب میوه، مربا و میوه‌های خشک‌شده به روش انجمادی است.

خشک کردن یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی است که حذف رطوبت محصول نتیجه انتقال همزمان جرم و حرارت در ماده غذایی است (دنگ و همکاران ۲۰۱۹). فرآیند خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات با کاهش رطوبت محصول، از فساد شیمیایی و بیوشیمیایی محصول جلوگیری کرده و سبب افزایش عمر نگهداری آن‌ها می‌شود. با این حال، برخی از تغییرات فیزیکی و شیمیایی نامطلوب مانند افت رنگ، بافت و ارزش تغذیه‌ای نیز ممکن است در طول خشک کردن اتفاق بیفتد که سبب کاهش پذیرش مصرف‌کنندگان می‌گردد (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۷؛

کایران و دویماز ۲۰۱۷). خشک کردن همرفتی با هوای داغ، رایج‌ترین روش خشک کردن مواد غذایی است؛ با این حال، این روش با وجود سهولت و سادگی، دارای معایبی نظیر مصرف انرژی زیاد و زمان خشک شدن طولانی به دلیل هدایت حرارتی پایین مواد غذایی است (انوود و همکاران ۲۰۱۶). همچنین، چروکیدگی قابل توجهی از طریق فروپاشی سلولی در نتیجه حذف آب ایجاد می‌شود. گرمای بیش از حد، به دلیل چروکیدگی بافت سبب بازسازی ضعیف محصول خشک شده می‌گردد و منجر به تغییرات نامطلوب در رنگ، طعم و ارزش تغذیه‌ای و آسیب جدی به صفات کیفی مواد غذایی می‌شود (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹؛ راتی ۲۰۰۱). با بکارگیری تکنولوژی مناسب برای فرآوری محصولات، می‌توان ضمن کاهش زمان فرآوری و بهبود شرایط انجام فرآیند، محصولاتی با کیفیت بالا همراه با حفظ ویژگی‌های طبیعی ماده اولیه را تولید کرد (ایکزی و همکاران ۲۰۱۷). در خشک کردن فوم‌مت، مواد غذایی با اضافه کردن عوامل فوم‌ساز و هم‌زدن در حضور و یا عدم حضور پایدارکننده‌های فوم، به فوم پایدار تبدیل شده و با استفاده از جریان‌های مختلف حرارتی خشک می‌شوند، بنابراین با انتخاب مناسب عوامل فوم‌ساز و شرایط خشک کردن می‌توان پودری با کیفیت بالا حاصل کرد (قدری و همکاران ۲۰۲۰؛ جاوید و همکاران ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر خشک کردن فوم‌مت به دلیل سادگی، صرفه جویی در هزینه، خشک شدن سریع و بهبود کیفیت محصولات تولید شده، اهمیت زیادی یافته است. خشک کردن انواع محصولات به شکل پودر باعث کاهش قابل توجه حجم و وزن شده، در نتیجه باعث به حداقل رساندن فضای ذخیره‌سازی و بسته‌بندی و همچنین، کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌گردد (شاری و همکاران ۲۰۱۸). علاوه بر این، در این روش خواص اولیه میوه‌های تازه مانند رنگ، عطر و طعم، ویتامین‌ها و ویژگی‌های حسی به دلیل آسیب حرارتی کمتر، بهتر حفظ

پودر اوآلبومین تهیه شده از سفیده تخم مرغ (شرکت سیگما آلدریچ، مدل A5253-250G، آلمان)، خریداری شده و در دمای ۴ درجه سلسیوس، در یخچال نگهداری شد. پودر متیل سلولز (شرکت سیگما-آلدریچ، مدل M0512-100G، آلمان) خریداری و محلول ۵٪ آن تهیه شده و در یخچال نگهداری شد. برای تهیه محلول متیل سلولز به عنوان پایدار کننده فوم، ۵ گرم از پودر متیل سلولز به آرامی به ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شده و به آرامی همزده شد. مخلوط حاصل به بن ماری با دمای ۹۰ درجه سلسیوس منتقل شده و به مدت نیم ساعت در آن باقی ماند. سپس، ظرف محتوای محلول به یک شیکر منتقل شد و در آنجا به مدت ۴۵ دقیقه، با دمای ۹۰ درجه سلسیوس و با دور تند (۱۲۰۰ rpm)، مخلوط گردید. محلول حاصل برای شفافیت بیشتر به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شد (عباسی و عزیزپور ۲۰۱۶).

برای تهیه فوم تمشک، اوآلبومین با غلظت ۰/۵٪ و متیل سلولز با غلظت ۰/۵٪ به ترتیب به عنوان عامل فوم ساز و پایدارکننده فوم به پالپ تمشک دیفراسه شده اضافه شد. درصدهای بهینه متیل سلولز و اوآلبومین برای ایجاد فوم پایدار از طریق آزمون و خطا به دست آمد. مخلوط حاصل توسط یک همزن الکتریکی (Moulinex، مدل HM-615، توان 500W) با حداکثر سرعت به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط و فوم حاصله در ضخامت ۷ میلی متر در پلیت آلومینیومی گسترده شد (عباسی و عزیزپور ۲۰۱۶). پلیت‌های آلومینیومی با استفاده از فویل آلومینیومی با ضخامت ۷۰ میکرون، به قطر ۱۴/۵ سانتی متر و ارتفاع ۲ سانتی متر با کمک یک پلیت شیشه‌ای الگو در همین ابعاد تهیه شد.

خشک کردن

از یک خشک کن هوای داغ همرفتی (۳۴/۵ × ۳۴/۵ × ۲۳۰ = ارتفاع × عرض × طول)، مجهز به دماسنج و

می شود (شاری و همکاران ۲۰۱۸؛ نگ و سلیمان ۲۰۱۸). در طول یک دهه گذشته، این تکنولوژی بسیار مورد توجه بوده و برای بسیاری از میوه‌ها و مواد غذایی مانند کاراگینان (دجائی و همکاران ۲۰۱۵)، ریشه یاکون (فرانکو و همکاران ۲۰۱۵)، انبه (چوکس-گوتیرز و همکاران ۲۰۱۷)، آناناس (شاری و همکاران ۲۰۱۸)، چغندر قرمز (نگ و سلیمان ۲۰۱۸)، آبلیمو (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹) و انار (آکتاس و تونتول ۲۰۲۱) مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود تأثیر سرعت جریان هوا بر سینتیک خشک شدن و سایر پارامترهای فرآیندی و در نتیجه بر خصوصیات کیفی و عملکردی محصول خشک شده، در خصوص تأثیر سرعت هوا بر خشک کردن فوم مت محصولات کشاورزی و غذایی، مطالعات اندکی صورت گرفته است. لذا با توجه به آنچه که بیان شد و با توجه به پتانسیل‌های میوه تمشک و خشک کردن فوم مت، هدف از مطالعه حاضر، بررسی تأثیر سرعت هوای خشک کردن (۲ تا ۴ متر بر ثانیه) بر ضریب انتشار موثر رطوبت، سینتیک خشک شدن و همچنین، بررسی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی مانند دانسیته توده‌ای و ضربه‌ای، جریان پذیری پودر، دانسیته ذره‌ای، شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب، تخلخل توده‌ای پودر، محتوای رطوبت و رنگ پودر تمشک تولید شده به روش فوم مت بود.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه و آماده سازی نمونه‌ها

تمشک سیاه پس از تهیه از بازار محلی در شمال کشور (استان گیلان) در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. تمشک ابتدا توسط غذا ساز کاملاً له شده و از مش شماره ۳۰ عبور داده شد. سپس، پالپ آن در کیسه‌های پلی اتیلنی بسته بندی شده و در فریزر با دمای ۲۰- درجه سلسیوس، تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری گردید.

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

در طول فرآیند خشک کردن، پدیده غالب انتقال رطوبت از مرکز به سطح فوم، انتشار است. بنابراین میزان حذف رطوبت با استفاده از معادله کرنک که از قانون دوم فیک مشتق شده است، حاصل می‌شود (جو و همکاران ۲۰۱۶):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad [3]$$

که در آن، MR نسبت رطوبت، M_t مقدار رطوبت در لحظه t بر پایه خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، M_0 رطوبت اولیه و M_e رطوبت تعادلی بر پایه خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه)، L ضخامت فوم (متر) و t زمان فرآیند خشک کردن (ثانیه) می‌باشد. برای زمان‌های خشک کردن طولانی فقط جمله اول سری را مطابق معادله [۴]، در نظر می‌گیرند (فرانکو و همکاران ۲۰۱۶):

$$MR = \frac{M_t}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad [4]$$

با لگاریتم گرفتن از طرفین معادله [۴] و محاسبه شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در برابر زمان فرآیند خشک کردن، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل می‌شود (فرانکو و همکاران ۲۰۱۶):

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad [5]$$

$$Slope = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad [6]$$

$$D_{eff} = \frac{Slope \times 4L^2}{\pi^2} \quad [7]$$

آزمون‌های فیزیکی شیمیایی پودر تمشک

دانسیته توده‌ای و ضربه‌ای پودر

دانسیته توده‌ای پودر با اندازه‌گیری حجم اشغال شده توسط ۲ گرم پودر در استوانه مدرج ۰/۰۱ لیتری بدون ضربه زدن به آن طبق معادله [۸]، محاسبه شد. دانسیته‌ی ضربه‌ای پودر نیز مطابق معادله [۹]، با ضربه زدن به

رطوبت‌سنج در قسمت خروجی و ورودی با قابلیت تنظیم پارامترهای فرآیندی استفاده شد. خشک کردن توسط خشک‌کن هوای داغ کنوکسیون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ تا ۴ متر بر ثانیه انجام پذیرفت. افت رطوبت به وسیله وزن کردن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۵ دقیقه بر روی یک ترازوی الکترونیکی (با دقت ۰/۰۱ ± گرم) ارزیابی شد. معیار تکمیل فرآیند خشک کردن، رسیدن به محتوای رطوبت تعادلی بود (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۸). پس از اتمام فرآیند، نمونه‌ها توسط کاردک مخصوص از سطح پلیت خراش داده شده و سریعاً توسط هاون چینی آسیاب شدند. پودر بدست‌آمده بسته‌بندی و تا انجام آنالیزهای بعدی در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹).

سینتیک خشک شدن

نسبت رطوبت

برای محاسبه نسبت رطوبت از معادله زیر استفاده شد (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad [1]$$

که در آن، M محتوای رطوبت بر مبنای خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد) در زمان t ، M_0 محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و M_e محتوای رطوبت تعادلی بر مبنای خشک می‌باشد که به علت ناچیز بودن مقدار آن در برابر M_0 و M ، قابل صرف‌نظر کردن است.

نرخ خشک شدن

نرخ خشک شدن با استفاده از رابطه [۲]، محاسبه شد. که در آن، $M_{t+\Delta t}$ محتوای رطوبت در زمان $t+\Delta t$ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد خشک)، Δt اختلاف زمانی بر حسب دقیقه و t زمان بر حسب دقیقه است (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹).

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad [2]$$

تخلخل توده‌ای (داخل گرانولی) پودر

تخلخل توده‌ای از نسبت دانسیته توده‌ای به دانسیته ذره‌ای مطابق فرمول زیر حاصل شد (فرانکو و همکاران ۲۰۱۶):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad [13]$$

قابلیت جریان یافتن

قابلیت جریان یافتن با استفاده از شاخص کار و نسبت هوسنر طبق معادلات زیر محاسبه گردید (سیرانگورایار و همکاران ۲۰۱۷؛ دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹):

$$CI = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_T} \times 100 \quad [14]$$

$$HR = \frac{\rho_T}{\rho_B} \quad [15]$$

جدول ۱- طبقه بندی قابلیت جریان یافتن پودرها بر اساس

مقادیر CI و HR

Table 1- Classification of flowability of powder based on CI and HR values

Flowability	Carr index (CI), %	Hausner ratio (HR)
Excellent	0-10	1.00-1.11
Good	11-15	1.12-1.18
Fair	16-20	1.19-1.25
Passable	21-25	1.26-1.34
Poor	26-31	1.35-1.45
Very poor	32-37	1.46-1.59
Very, very poor	>38	>1.60

شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب

بر اساس محدوده شاخص کار و نسبت هوسنر طبقه بندی جریان پذیری پودرها صورت گرفت (آسوکاپاندیان و همکاران ۲۰۱۶).

۲/۵ گرم پودر تمشک به ۰/۰۳ لیتر آب مقطر اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق همزده شد. سپس، مخلوط حاصل به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۳۰۰ (دور در دقیقه) سانتریفوژ گردید. سوپرناتانت به آرامی به پلیت

استوانه حاوی پودر (۱۰ ضربه تا ارتفاع ۰/۱۵ متر) محاسبه شده و حجم نهایی آن ثبت شد (میترا و همکاران ۲۰۱۵).

$$\text{Bulk Density}(\rho_B) = \frac{\text{Mass of powder (g)}}{\text{Volume of powder (cm}^3\text{)}} \quad [8]$$

$$\text{Tap Density}(\rho_T) = \frac{\text{Mass of powder (g)}}{\text{Final tapped volume (cm}^3\text{)}} \quad [9]$$

در این رابطه، ρ_b دانسیته توده‌ای پودر (کیلوگرم بر متر مکعب) و ρ_T دانسیته ضربه‌ای پودر (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

دانسیته ذره‌ای (مطلق) پودر

۱ گرم پودر تمشک به یک پیکنومتر ۰/۰۱ لیتری منتقل شده و با تولوئن پر شد و دانسیته ذره‌ای به صورت زیر محاسبه گردید (کاپارینو و همکاران ۲۰۱۲):

$$\rho_p = \frac{m_s}{v_s} \quad [10]$$

که در آن، ρ_p دانسیته ذره‌ای (کیلوگرم بر متر مکعب)، m_s وزن پودر خشک شده (کیلوگرم) و v_s حجم ماده خشک شده (متر مکعب) است. حجم ماده جامد (حجم پودر) توسط روش جابجایی تولوئن با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (کاپارینو و همکاران ۲۰۱۲):

$$v = v_f - \frac{M_{sf}}{\rho_s} \quad [11]$$

$$M_{SF} = M_{t+s} - M_f - M \quad [12]$$

که در آن، v_f حجم ارلن مایر (متر مکعب)، M_{sf} وزن تولوئن اضافه شده برای پر کردن ارلن مایر (کیلوگرم)، M_{t+s} وزن ارلن به همراه نمونه و حلال (کیلوگرم)، M_f وزن ارلن مایر (کیلوگرم)، M وزن نمونه (کیلوگرم) و ρ_s دانسیته تولوئن در دمای ۲۰ درجه سلسیوس (برابر ۸۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

شاخص کروما و زاویه هیو، با استفاده از پارامترهای رنگی a^* ، b^* و L^* بدست آمده و مطابق فرمول‌های زیر محاسبه شد (کاپریانو و همکاران ۲۰۱۲، دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۹):

$$\Delta E = \left((L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2 \right)^{0.5} \quad [17]$$

$$Chroma = (a_t^{*2} + b_t^{*2})^{0.5} \quad [18]$$

$$Hue\ Angle = \tan^{-1} \left(\frac{b_t^*}{a_t^*} \right) \quad [19]$$

آنالیز آماری

در این مطالعه، آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تمامی آزمایش‌های خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های ۲، ۳، ۴ متر بر ثانیه و در ۳ تکرار انجام شد. تأثیر هر کدام از تیمارها بر روی ویژگی‌های کیفی و کمی محصول شامل محتوای رطوبت، نسبت رطوبت، نرخ خشک شدن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب، دانسیته، قابلیت جریان یافتن و رنگ پودر بررسی شد. مقایسه میانگین بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد توسط نرم افزار SPSS انجام گرفت.

نتایج و بحث

تأثیر سرعت هوای خشک کردن بر شاخص‌های کمی و کیفی

کیفی

محتوای رطوبت

تغییرات محتوای رطوبت در مقابل زمان خشک کردن در سرعت‌های مختلف خشک کردن، در شکل ۱، نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه، محتوای رطوبت فوم پالپ تمشک کاهش یافت. با این حال، با افزایش سرعت هوا از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، محتوای رطوبت

منتقل شده و در آن خشک شد. شاخص حلالیت در آب (بر حسب درصد) به صورت نسبت وزن جامدات خشک شده سوپرناتانت، به وزن خشک نمونه اولیه محاسبه گردید. همچنین، نسبت ماده جامد خیس باقی مانده بعد از سانتریفوژ به وزن خشک نمونه اولیه بیانگر شاخص جذب آب است (میترا و همکاران ۲۰۱۵).

محتوای رطوبت پودر بر مبنای خشک

برای محاسبه محتوای رطوبت بر مبنای خشک، نمونه‌ها در یک آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و وزن آن‌ها هر دو ساعت یک بار اندازه گیری شد و این عمل تا زمانی ادامه یافت که تفاوتی بین دو وزن متوالی مشاهده نشد. محتوای رطوبت بر پایه خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده جامد خشک) با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه شد. که در آن MC محتوای رطوبت بر مبنای خشک، W_m جرم آب نمونه (کیلوگرم) و W_d جرم ماده خشک نمونه (کیلوگرم) است (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۸).

$$MC(db) = \frac{W_m}{W_d} \times 100 \quad [16]$$

اندازه گیری رنگ

برای آنالیز تغییرات رنگ پودرهای تمشک از یک دستگاه هانتربل طراحی شده در آزمایشگاه خواص بیوفیزیک و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه تبریز استفاده شد. در این راستا، عکس‌برداری از نمونه‌ها توسط دوربین دیجیتالی (canon، مدل S90، ساخت ژاپن) با رزولوشن ۱۰ مگاپیکسل انجام گرفت. سپس، پارامترهای رنگی در نرم افزار Adobe Photoshop (ورژن 2017.1 cc) اندازه گیری شدند. این پارامترها شامل میزان روشنایی یا L^* از رنگ سیاه (۰) تا سفید (۱۰۰)، میزان قرمزی یا a^* از سبز (مقادیر منفی) تا قرمز (مقادیر مثبت)، میزان زردی یا b^* از آبی (مقادیر منفی) تا زرد (مقادیر مثبت) می‌باشند. همچنین، مقادیر شاخص‌های تغییر رنگ کلی،

تأثیری در تسهیل خروج رطوبت از محصول نداشت و هیچ تغییری در نسبت رطوبت محصول مشاهده نگردید. جدول ۲، نشان می‌دهد که تغییرات میانگین نسبت رطوبت فوم پالپ تمشک در سرعت‌های خشک کردن مختلف، معنی‌دار نبود ($p > 0.05$).

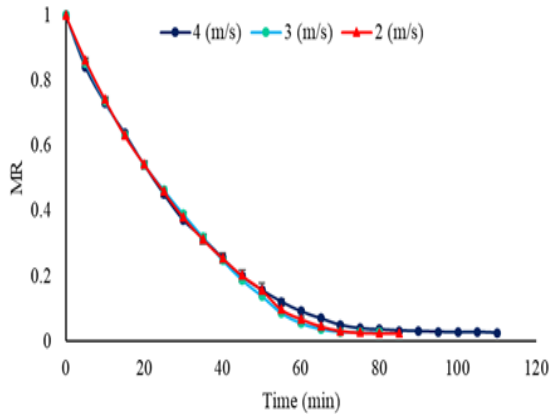
نرخ خشک شدن

با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که در ابتدای فرآیند خشک کردن، به علت بالاتر بودن محتوای رطوبت در سطح حباب‌ها، نرخ خشک شدن افزایش یافت. با این حال، در انتهای این مرحله و با ورود به مرحله سرعت نزولی، تمامی آب آزاد موجود در سطح تبخیر شده و بدلیل مقاومت در برابر حذف رطوبت، نرخ خشک شدن محصول کاهش پیدا کرد. نتایج تحقیقات ولیک و همکاران (۲۰۰۴)، نشان داد که با افزایش سرعت هوای خشک کردن طی خشک کردن میوه سیب، زمان لازم برای رسیدن به محتوای رطوبت تعادلی کاهش یافت. میانگین تغییرات نرخ خشک شدن در سرعت‌های مختلف خشک کردن در جدول ۲، ارائه شده است. با توجه به این جدول، با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۴ متر بر ثانیه، نرخ خشک شدن فوم تمشک، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت ($p > 0.05$). برخلاف نتایج حاصل از این مطالعه، چاندراموهان (۲۰۱۸) مشاهده کرد که با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۴ متر بر ثانیه، به دلیل افزایش نرخ انتقال جرم و حرارت، نرخ خشک شدن محصول به طور معنی‌داری افزایش یافت؛ درحالی‌که، افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، سبب کاهش نرخ خشک شدن محصول شد. نرخ خشک شدن مواد فومی به غیر از ضخامت لایه، دما و سرعت هوا، به میزان زیادی به خصوصیات فوم به ویژه پایداری، دانسیته و اندازه حباب، بستگی دارد (راتی و کودرا ۲۰۰۶).

فوم به میزان کمتری کاهش یافته و مدت زمان خشک کردن محصول افزایش پیدا کرد. شارما و همکاران (۲۰۰۵) نیز در خشک کردن ورقه‌های پیاز مشاهده کردند که افزایش سرعت هوای خشک کردن، با خنک کردن سطح محصول، نرخ انتقال حرارت را کاهش داده و سبب کاهش میزان خروج رطوبت از محصول گردید. با این حال، نتایج ولیک و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که افزایش سرعت هوای خشک کردن، سبب کاهش محتوای رطوبت و زمان خشک شدن محصول شد. جدول ۱، میانگین تغییرات محتوای رطوبت فوم تمشک را در سرعت‌های مختلف خشک کردن نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که میانگین تغییرات محتوای رطوبت در سرعت‌های مختلف خشک کردن، در بازه ۲/۶۲۳ تا ۳/۰۹۴ بود و این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود ($p > 0.05$).

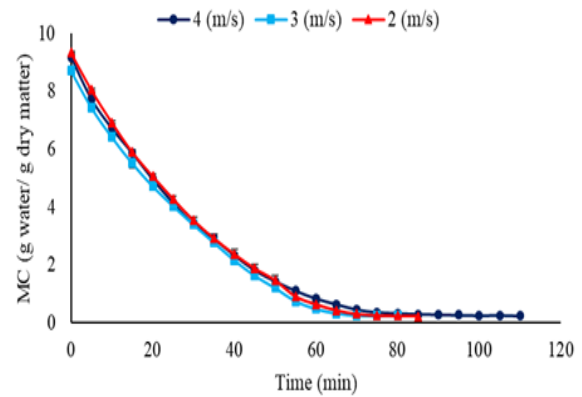
نسبت رطوبت

شکل ۲، روند تغییرات نسبت رطوبت فوم پالپ تمشک را در سرعت‌های مختلف خشک کردن نشان می‌دهد. با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، مدت زمان خشک کردن فوم افزایش یافت (شکل ۲). همچنین، میانگین تغییرات نسبت رطوبت در سرعت ۳ متر بر ثانیه کمترین مقدار را داشت و با افزایش سرعت تا ۴ متر بر ثانیه، روند کاهشی نسبت رطوبت محصول، کاهش یافت. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داد که نمونه‌های خشک شده در سرعت هوای بالاتر، نسبت رطوبت بالاتری در مقایسه با نمونه‌های خشک شده در سرعت هوای پایین‌تر داشتند (آدمیلوی و آبووی ۲۰۱۳؛ خزائی و همکاران ۲۰۰۸؛ کومار و همکاران ۲۰۱۱). با این حال، تزمپلیکوس و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که طی خشک کردن میوه به با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۱ تا ۲ متر بر ثانیه، نسبت رطوبت کاهش یافت؛ در صورتیکه، افزایش سرعت هوا از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه،



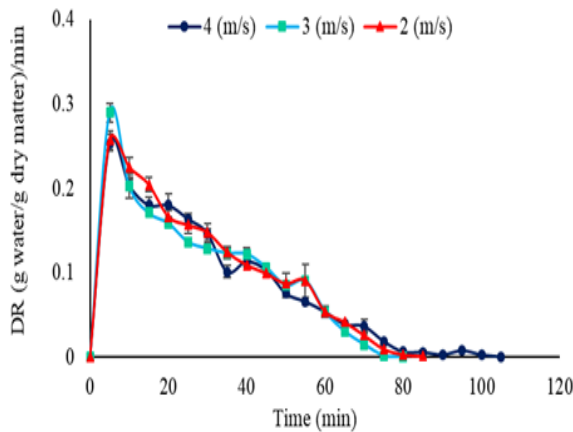
شکل ۱- تاثیر سرعت هوا بر محتوای رطوبت فوم در طول خشک شدن

Figure 1- Effect of air velocity on moisture content of foam during drying



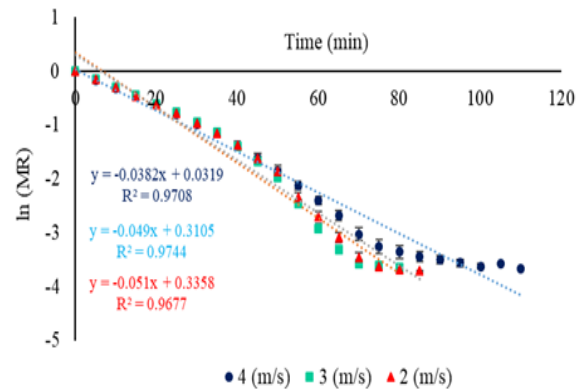
شکل ۲- تاثیر سرعت هوا بر نسبت رطوبت فوم در طول خشک شدن

Figure 2- Effect of air velocity on moisture ratio of foam during drying



شکل ۳- تاثیر سرعت هوا بر نرخ خشک شدن

Figure 3- Effect of air velocity on drying rate



شکل ۴- تاثیر سرعت هوا بر $\ln(MR)$

Figure 4- Effect of air velocity on $\ln(MR)$

محصول، انتشار رطوبت افزایش یافت؛ با این حال، با پیشرفت فرآیند خشک کردن به دلیل کاهش محتوای رطوبت محصول، انتشار رطوبت کاهش پیدا کرد. همچنین، این شکل نشان می‌دهد که شیب خط $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک کردن، در سرعت هوای ۴ متر بر ثانیه، در مقایسه با سایر سرعت‌ها کمتر بود. مقادیر میانگین ضریب انتشار مؤثر رطوبت در سرعت‌های

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

ضریب انتشار مؤثر رطوبت در مواد غذایی، خصوصیات انتقال جرم از جمله انتشار مولکولی، انتشار مایع و بخار، هیدرودینامیک و سایر مکانیسم‌های انتقال جرم را توصیف می‌کند (آسوکاپاندیان و همکاران ۲۰۱۶). با توجه به شکل ۴، مشاهده می‌گردد که در ابتدای فرآیند خشک کردن به دلیل بالاتر بودن محتوای رطوبت

یافت ($p < 0/05$)، که می‌توان آن را به محتوای رطوبت بالاتر پودر در سرعت‌های خشک کردن بالاتر نسبت داد. دانسیته پودرها به محتوای رطوبت، ساختار و اندازه ذرات بستگی دارد؛ در محتوای رطوبت بالاتر پودر، تمایل به هم چسبیدن ذرات پودر بیشتر بوده و فضای خالی بین ذرات افزایش می‌یابد و همین امر موجب افزایش حجم ذرات و کاهش دانسیته توده‌ای پودر می‌گردد (جاکوبزیک و همکاران ۲۰۱۱). نتایج مطالعات عقلی ناطق و همکاران (۲۰۱۵)، نشان داد که با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه، دانسیته توده‌ای به طور معنی‌داری ($p < 0/05$) کاهش یافت که مطابق با نتایج این مطالعه بود؛ آن‌ها علت این امر را تغییرات احتمالی ساختار پودر در سرعت‌های بالاتر خشک کردن بیان کردند. تغییرات دانسیته توده‌ای به طور مستقیم تحت تاثیر شرایط خشک کردن بوده و به عواملی از جمله نرخ خشک شدن، ویژگی‌های ریزساختاری و بافت محصول بستگی دارد (دهقان نیا و همکاران ۲۰۱۶).

دانسیته ذره‌ای (مطلق) پودر

دانسیته ذره‌ای به نسبت وزن ذرات پودر به حجم اشغال شده توسط آن‌ها اطلاق می‌شود و فضای خالی بین ذرات را در نظر نمی‌گیرد (فرانکو و همکاران ۲۰۱۶). میانگین تغییرات دانسیته ذره‌ای در سرعت‌های مختلف خشک کردن در جدول ۳، ارائه شده است. با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌گردد که دانسیته ذره‌ای پودر با افزایش سرعت هوای خشک کردن به طور معنی‌داری کاهش یافت ($p < 0/05$). دانسیته ذره‌ای، برای پیش بینی کیفیت ذرات پودر بسیار مهم است و کاهش بیشتر دانسیته توده‌ای در مقایسه با دانسیته ذره‌ای، ممکن است به هوای به دام افتاده در طول تهیه فوم، مربوط باشد (فرانکو و همکاران ۲۰۱۶).

خشک کردن مختلف، در جدول ۲، گزارش شده است. با توجه به این جدول، ضریب انتشار مؤثر رطوبت با افزایش سرعت هوا از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه، به طور معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0/05$). در صورتیکه، افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، سبب کاهش معنی‌دار ($p < 0/05$) ضریب انتشار مؤثر رطوبت گردید. مطابق با نتایج حاصل از این مطالعه، بلاسکو و همکاران (۲۰۰۶) نیز در بررسی اثر سرعت هوا در خشک کردن زردچوبه، دریافتند که با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۰/۲ تا ۲/۱ متر بر ثانیه، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت؛ درحالی‌که، افزایش سرعت هوا از ۲/۱ تا ۴ متر بر ثانیه، به دلیل وجود مقاومت داخلی در برابر خروج رطوبت، سبب کاهش ضریب انتشار مؤثر رطوبت گردید. همچنین، نتایج تحقیقات چانداراموهان (۲۰۱۸)، نشان داد که با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۴ متر بر ثانیه، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت؛ در صورتیکه، با افزایش سرعت هوا از ۴ تا ۶ متر بر ثانیه، تغییری در مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت حاصل نشد. وی بیان کرد، افزایش ضرایب انتقال جرم و حرارت، سبب افزایش دمای سطح شده و ضریب انتشار مؤثر رطوبت را افزایش می‌دهد.

دانسیته توده‌ای و ضربه‌ای

دانسیته توده‌ای، عاملی است که به طور مستقیم با سهولت بازسازی مجدد، بسته بندی، حمل و نقل و بازاریابی محصولات پودری، مرتبط است. همچنین، یک محصول خشک شده با دانسیته توده‌ای بالاتر، توانایی نگهداری در بسته‌های کوچک را دارد (فرانکو و همکاران ۲۰۱۵). با توجه به جدول ۳، با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۴ متر بر ثانیه، دانسیته توده‌ای و دانسیته ضربه‌ای پودر تمشک به طور معنی‌داری کاهش

جدول ۲- مقادیر میانگین محتوای رطوبت (MC)، نسبت رطوبت (MR)، نرخ خشک شدن (DR) و ضریب انتشار موثر رطوبت (D_{eff}) در سرعت‌های مختلف هوا

Table 2- Mean values of moisture content (MC), moisture ratio (MR), drying rate (DR) and effective moisture diffusivity (D_{eff}) at various air velocity

	Air velocity (m/s)		
	2	3	4
MC (g w/g dry matter)	3.064 ^a ± 0.386	2.623 ^a ± 0.396	3.094 ^a ± 0.347
MR (dimensionless)	0.352 ^a ± 0.044	0.291 ^a ± 0.037	0.331 ^a ± 0.042
DR (g w/g dry matter)/ min	0.096 ^a ± 0.011	0.151 ^a ± 0.010	0.110 ^a ± 0.010
D_{eff} (m ² /s)	1.391×10 ^{-8a} ± 1.148×10 ⁻⁸	1.723×10 ^{-8b} ± 6.626×10 ⁻¹⁰	1.391×10 ^{-8a} ± 1.148×10 ⁻¹⁰

*Different superscripts within the same line represent significant difference at P<0.05.

چسبندگی پودرها کمتر باشد، جریان‌پذیری آن‌ها بهبود می‌یابد (دومین و پازیتک ۲۰۰۵، عزیز و همکاران ۲۰۱۸). با توجه به جدول ۳، میانگین مقادیر شاخص کار و نسبت هوسنر به ترتیب در بازه ۱۲/۵۵۸ تا ۲۲/۴۵۷ و ۱/۱۴۴ تا ۱/۲۸۹ بود و مقادیر آن‌ها با افزایش سرعت هوای خشک کردن، به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد ($p < 0.05$). با این حال، کمترین مقادیر شاخص کار و نسبت هوسنر که بیانگر جریان‌پذیری بهتر پودر است، در سرعت ۳ متر بر ثانیه حاصل شد، که بر اساس طبقه بندی جریان‌پذیری پودرها (جدول ۱)، در دسته پودرهایی با قابلیت جریان‌پذیری خوب قرار داشت. در این مطالعه، علت کاهش جریان‌پذیری پودر با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه را می‌توان به داناتوراسیون پروتئین‌ها به دلیل طولانی بودن مدت زمان فرآیند خشک کردن در سرعت هوای ۴ متر بر ثانیه، نسبت داد.

محتوای رطوبت پودر تمشک

با کاهش محتوای رطوبت پودر مواد غذایی، چسبندگی نهایی پودر کمتر می‌شود و سبب افزایش سطح در دسترس جهت بازجذب آب خواهد شد (صلاحی و همکاران ۲۰۱۵). میانگین تغییرات محتوای تمشک در سرعت‌های مختلف خشک کردن در جدول ۳، گزارش شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت هوای خشک کردن، محتوای رطوبت پودر

تخلخل توده‌ای (داخل گرانولی) پودر

تخلخل به عنوان کسری از حجم منافذ نمونه در مقایسه با حجم کل آن تعریف شده است (روسو ۲۰۱۳). تخلخل توده‌ای، یک ویژگی مهم برای ارزیابی کیفیت پودر است؛ زیرا، وجود حفره‌های بیشتر در پودر حاکی از وجود مقدار زیاد اکسیژن در آن است، که سبب تخریب سریع محصول و افت کیفیت آن می‌گردد (آرایا فارایس و راتی ۲۰۰۹). در این مطالعه، تخلخل توده‌ای پودر تمشک، با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه، کاهش و با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، افزایش یافت؛ با این حال، تغییرات تخلخل توده‌ای در سرعت‌های مختلف خشک کردن از لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌دار نبود (جدول ۳). دینانی و همکاران (۲۰۱۵)، علت افزایش تخلخل در سرعت‌های خشک کردن بالاتر را به خشک شدن سریع محصول و تبخیر بیشتر رطوبت نسبت دادند.

قابلیت جریان یافتن

جریان‌پذیری، یک از ویژگی‌های مهم برای ذرات خشک شده است و با شاخص کار و نسبت هوسنر بیان می‌شود. مقادیر بالاتر شاخص کار، نشان‌دهنده جریان‌پذیری ضعیف پودر است. نسبت هوسنر نیز بیانگر چسبندگی ذرات است و میزان چسبندگی پودرها، ثبات و خاصیت جریان آن‌ها را تعیین می‌کند. هر چقدر

همکاران ۲۰۱۶) و بیانگر توانایی جذب آب مواد غذایی خشک می‌باشد (شاری و همکاران ۲۰۱۸). در این مطالعه، با افزایش سرعت هوای خشک کردن، شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) افزایش یافتند (جدول ۳). طبق پژوهش لی و همکاران (۲۰۱۷)، بین دانسیته پودر و حلالیت آن نسبت عکس وجود دارد؛ از این رو، در این مطالعه به دلیل دانسیته پایین‌تر پودر تمشک در سرعت‌های خشک کردن بالاتر، شاخص حلالیت در آب بیشتر بود. خشک کردن به روش فوممت، سبب تولید پودر با رطوبت و چسبندگی کمتر شده و سطح اتصال آب را افزایش می‌دهد. همچنین، محصولات پودری با شاخص جذب آب بالاتر، توانایی کافی برای آماده سازی فوری (حتی در دماهای پایین آب) را دارند (فرانکو و همکاران ۲۰۱۶)

تمشک به طور معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0.05$)، که علت آن را می‌توان به کمتر بودن نرخ خشک شدن و میزان تبخیر در سرعت ۴ متر بر ثانیه نسبت داد. در تطابق با نتایج حاصل از این مطالعه، گولا و آداموپلوس (۲۰۰۵) نیز مشاهده کردند که محتوای رطوبت پودر گوجه فرنگی با افزایش سرعت هوای خشک کردن افزایش یافت.

شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب

شاخص حلالیت در آب، توانایی پودر برای همگن شدن، هنگام مخلوط کردن با آب است. در طول بازسازی، یک پودر عالی باید بلافاصله و بدون فرو رفتن و تشکیل توده حل شوند. همچنین، شاخص جذب آب، وزن آب جذب شده در هر گرم از نمونه خشک بوده (آسوکاپاندیان و

جدول ۳- ویژگی‌های کیفی پودر تمشک در سرعت‌های مختلف هوا

Table 3- The qualitative properties of the raspberry powder at various air velocity

property	Air velocity (m/s)		
	2	3	4
Bulk density (g/cm^3)	0.252 ^a ± 0.001	0.250 ^a ± 0.002	0.225 ^b ± 0.004
Tap density (g/cm^3)	0.302 ^b ± 0.004	0.286 ^a ± 0.001	0.278 ^a ± 0.001
Absolute density (g/cm^3)	1.204 ^c ± 0.014	1.121 ^b ± 0.004	1.110 ^a ± 0.001
Carr index (%)	16.575 ^b ± 0.362	12.588 ^a ± 0.406	22.457 ^c ± 0.232
Hausner ratio	1.199 ^b ± 0.005	1.144 ^a ± 0.005	1.289 ^a ± 0.004
Moisture content of powder (%)	18.740 ^a ± 0.012	18.850 ^b ± 0.041	19.380 ^c ± 0.013
Intragranular porosity	0.791 ^a ± 0.0013	0.777 ^a ± 0.009	0.799 ^a ± 0.003
Water solubility index (%)	57.493 ^a ± 1.429	57.644 ^b ± 2.523	61.693 ^c ± 1.223
Water absorption index	7.868 ^b ± 0.042	7.661 ^a ± 0.031	8.181 ^c ± 0.096

*Different superscripts within the same line represent significant difference at $P < 0.05$

همکاران ۲۰۱۷). در این مطالعه، تغییرات پارامترهای رنگی a^* و b^* در سرعت‌های مختلف خشک کردن از لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌دار نبود (جدول ۴). با این حال، با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، روشنایی پودر (L^*)، افزایش پیدا کرد ($p < 0.05$). فرانکو و همکاران (۲۰۱۶)، بیان کردند میزان روشنایی پودر به عوامل مختلفی از جمله غلظت و نوع رنگدانه‌های

پارامترهای رنگی

رنگ پودرها عامل مهمی در پذیرش آن‌ها توسط مصرف‌کنندگان است. حتی اگر پودرهای خوراکی در سایر محصولات قابل استفاده بوده و برای سلامتی مصرف‌کنندگان مزایای قابل توجهی داشته باشند؛ در صورتیکه، رنگ جذاب نداشته باشند ممکن است از طرف مصرف‌کنندگان مورد قبول واقع نشوند (جعفری و

۴ متر بر ثانیه، سبب کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) اختلاف رنگ کلی گردید (جدول ۴). دینانی و همکاران (۲۰۱۵)، بیان کردند که اختلاف رنگ کلی بالاتر، به غلظت رنگ بیشتر یا واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی مربوط است و در پودرهایی با محتوای رطوبت پایین، بیشتر است. با توجه به جدول ۴، مشاهده می‌شود که به دلیل وقوع واکنش‌های میلارد در زمان‌های طولانی خشک کردن، میانگین شاخص کروما با افزایش سرعت هوای خشک کردن به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) افزایش یافت. با این حال، تغییرات زاویه هیو در سرعت‌های مختلف خشک کردن، از لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌دار نبود.

موجود، میزان آب و غلظت آب موجود در سطح محصول بستگی دارد. مطابق با نتایج حاصل از این مطالعه، نیامنوی و دواهاستین (۲۰۰۵) نیز گزارش کردند که افزایش سرعت هوای خشک کردن تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای رنگی a^* و b^* نداشت ($p > 0.05$).

اختلاف رنگ کلی، شاخص کروما و زاویه هیو

رنگ یکی از پارامترهای مهم برای سنجش کیفیت محصولات خشک شده است و فاکتورهای زیادی مانند نوع میوه، رسیدگی آن و نوع روش خشک کردن، بر رنگ محصول نهایی تأثیر می‌گذارد (شاری و همکاران ۲۰۱۸). در این مطالعه، افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا

جدول ۴- پارامترهای رنگی پودر تمشک در سرعت‌های مختلف هوا

Table 4- Color parameters of raspberry powder at different air velocity

Color parameters	Air velocity (m/s)		
	2	3	4
L*	32.123 ^{ab} ± 1.652	30.310 ^a ± 1.103	36.023 ^b ± 0.619
a*	26.078 ^a ± 1.690	33.463 ^a ± 2.277	22.753 ^a ± 1.712
b*	7.847 ^a ± 0.495	9.193 ^a ± 0.096	9.097 ^a ± 0.542
ΔE	30.850 ^b ± 1.992	24.272 ^a ± 2.364	23.723 ^a ± 0.395
Chroma	26.695 ^a ± 1.722	34.217 ^b ± 2.433	33.477 ^b ± 0.371
Hue angle	15.997 ^a ± 0.469	15.404 ^a ± 1.050	15.000 ^a ± 0.499

*Different superscripts within the same line represent significant difference at $P < 0.05$.

نتیجه گیری

معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0.05$). همچنین، میانگین ضریب انتشار موثر رطوبت با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۲ تا ۳ متر بر ثانیه، به طور معنی‌داری افزایش یافت؛ در صورتیکه افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، سبب کاهش مقدار آن گردید ($p < 0.05$). این مطالعه نشان می‌دهد که سرعت هوای خشک کردن بر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی پودر تمشک تأثیرگذار بوده و پودر تمشک حاصل از خشک‌کردن با سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه، بدلیل دارابودن قابلیت جریان‌پذیری و شاخص جذب آب بالاتر، میتواند به عنوان رنگ طبیعی در صنعت مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، تأثیر سرعت هوای خشک کردن (۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه) روی پارامترهای کمی و کیفی پالپ تمشک خشک شده به روش فوممت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آماری نشان داد که افزایش سرعت هوای خشک کردن، سبب کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) دانسیته توده‌ای و ضربه‌ای، دانسیته نره‌ای و قابلیت جریان یافتن پودر شد. با این حال، شاخص حلالیت در آب، شاخص جذب آب، محتوای رطوبت پودر و میزان روشنایی پودر (L^*)، با افزایش سرعت هوای خشک کردن از ۳ تا ۴ متر بر ثانیه، به طور

منابع مورد استفاده

- Abbasi E, Azizpour M, 2016. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. *LWT-Food Science and Technology* 68:105-110.
- Ademiluyi F, Abowei M, 2013. Theoretical model for predicting moisture ratio during drying of spherical particles in a rotary dryer. *Modelling and Simulation in Engineering* 2013.
- Aghilinategh N, Rafiee S, Gholikhani A, Hosseinpour S, Omid M, Mohtasebi SS and Maleki N, 2015. A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food science & nutrition* 3:519-526.
- Aktas RN and Tontul I, 2021. Usability of soapwort and horse chestnut saponin extracts as foaming agents in foam mat drying of pomegranate juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101:786-793.
- Araya-Farias M and Ratti C, 2008. Dehydration of foods: general concepts, p 19-54, *Advances in food dehydration*. CRC Press.
- Asokapandian S, Venkatachalam S, Swamy GJ and Kuppusamy K, 2016. Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. *Journal of food process engineering* 39:692-701.
- Aziz M, Yusof Y, Blanchard C, Saifullah M, Farahnaky A and Scheiling G, 2018. Material properties and tableting of fruit powders. *Food Engineering Reviews* 10:66-80.
- Blasco M, García-Pérez J, Bon J, Carreres J and Mulet A, 2006. Effect of blanching and air flow rate on turmeric drying. *Food Science and Technology International* 12:315-323.
- Caparino O, Tang J, Nindo C, Sablani S, Powers J and Fellman J, 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of food engineering* 111:135-148.
- Chandramohan V, 2018. Influence of Air Flow Velocity and Temperature on Drying Parameters: An Experimental Analysis with Drying Correlation, in *International Conference of Mechanical, Materials and Renewable Energy IOP Conf Series, Materials Science and Engineering* p 012197.
- Chaux-Gutiérrez AM, Pérez-Monterroza EJ, Telis VRN and Mauro MA, 2017. The Physical and Morphological Characteristics of Mango Powder (*Mangifera indica* L. cv Tommy Atkins) Produced by Foam Mat Drying. *Food biophysics* 12:69-77.
- Dehghannya J, Gorbani R and Ghanbarzadeh B, 2016. Shrinkage of mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-assisted osmotic dehydration. *International journal of food properties* 19:1093-1103.
- Dehghannya J, Gorbani R and Ghanbarzadeh B, 2017. Influence of combined pretreatments on color parameters during convective drying of Mirabelle plum (*Prunus domestica* subsp. *syriaca*). *Heat and Mass Transfer* 53:2425-2433.
- Dehghannya J, Hosseinar S-H and Heshmati MK, 2018. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 45:132-151.
- Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B and Ghaffari H, 2019. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *International Journal of Thermal Sciences* 135:30-43.
- Deng LZ, Mujumdar AS, Zhang Q, Yang XH, Wang J, Zheng ZA, Gao ZJ and Xiao HW, 2019. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes—a comprehensive review. *Critical reviews in food science and nutrition* 59:1408-1432.
- Dinani ST and Havet M, 2015. Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices. *Industrial Crops and Products* 70:417-426.

- Djaeni M, Prasetyaningrum A, Sasongko S, Widayat W and Hii C, 2015. Application of foam-mat drying with egg white for carrageenan: drying rate and product quality aspects. *Journal of food science and technology* 52:1170-1175.
- Domian E and Poszytek K, 2005. Wheat flour flow ability as affected by water activity, storage time and consolidation. *International agrophysics* 19.
- Ekezie FGC, Sun DW, Han Z and Cheng JH, 2017. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology* 67:58-69.
- Franco TS, Perussello CA, Ellendersen LdSN and Masson ML, 2015. Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computer simulation. *Journal of Food Engineering* 158:48-57.
- Franco TS, Perussello CA, Ellendersen LN and Masson ML, 2016. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT-Food Science and Technology* 66:503-513.
- Goula AM and Adamopoulos KG, 2005. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. *Journal of food engineering* 66:35-42.
- Jafari SM, Ghalehnoei MG and Dehnad D, 2017. Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder technology* 311:59-65.
- Jakubczyka E, Gondeka E and Tamborb K, 2011. Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method. ICEF 11 International Congress on Engineering and Food, International Association of Engineering and Food Athens, Greece.
- Ju HY, Law CL, Fang XM, Xiao HW, Liu YH and Gao ZJ, 2016. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying. *Drying Technology* 34:1297-1306.
- Kayran S and Doymaz İ, 2017. Infrared drying and effective moisture diffusivity of apricot halves: Influence of pretreatment and infrared power. *Journal of Food Processing and Preservation* 4: e12827.
- Khazaei J, Khosro-Beygi Z, Arab-Hosseini A and Sivandi-Nasab S, 2008. Drying kinetics of *Zataria multiflora* (Avishan) leaves-intelligent and superposition modelling techniques, in Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world International Conference on Agricultural Engineering, Hersonissos, Crete, Greece, 23-25 June, 2008, European Society of Agricultural Engineers (AgEng).
- Kumar N, Sarkar B and Sharma H, 2011. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying. *Food science and technology international* 17:459-469.
- Lee KC, Yoon YS, Li FZ and Eun JB, 2017. Effects of inlet air temperature and concentration of carrier agents on physicochemical properties, sensory evaluation of spray-dried mandarin (*Citrus unshiu*) beverage powder. *Applied Biological Chemistry* 60:33-40.
- Mitra J, Shrivastava S and Rao PS, 2015. Characterization of vacuum dried onion slices. *Journal of Food Measurement and Characterization* 9:1-10.
- Morimoto C, Satoh Y, Hara M, Inoue S, Tsujita T and Okuda H, 2005. Anti-obese action of raspberry ketone. *Life sciences* 77:194-204.
- Niamnuy C and Devahastin S, 2005. Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. *Journal of food engineering* 66:267-271.
- Onwude DI, Hashim N and Chen G, 2016. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology* 57:132-145.
- Palonen P and Weber C, 2019. Fruit color stability, anthocyanin content, and shelf life were not correlated with ethylene production rate in five primocane raspberry genotypes. *Scientia Horticulturae* 247:9-16.
- Qadri OS, Srivastava AK and Yousuf B, 2020. Trends in foam mat drying of foods: Special emphasis on hybrid foam mat drying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 60:1667-1676.

- Rao AV and Snyder DM, 2010. Raspberries and human health: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58:3871-3883.
- Ratti C, 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of food engineering* 49:311-319.
- Ratti C and Kudra T, 2006. Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. *Drying Technology* 24:1101-1108.
- Russo P, Adiletta G and Di Matteo M, 2013. The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant. *Food and Bioproducts Processing* 91:249-256.
- Salahi MR, Mohebbi M and Taghizadeh M, 2015. Foam-Mat Drying of Cantaloupe (*Cucumis melo*): Optimization of Foaming Parameters and Investigating Drying Characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation* 39:1798-1808.
- Seeram NP, Adams LS, Zhang Y, Lee R, Sand D, Scheuller HS and Heber D, 2006. Blackberry, black raspberry, blueberry, cranberry, red raspberry, and strawberry extracts inhibit growth and stimulate apoptosis of human cancer cells in vitro. *Journal of agricultural and food chemistry* 54:9329-9339.
- Seerangurayar T, Manickavasagan A, Al-Ismaili AM and Al-Mulla YA, 2017. Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. *Journal of Food Engineering* 215:33-43.
- Shaari NA, Sulaiman R, Rahman RA and Bakar J, 2018. Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. *Journal of Food Processing and Preservation* 42: e13467.
- Sharma G, Verma R and Pathare P, 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering* 71:282-286.
- Si X, Chen Q, Bi J, Yi J, Zhou L and Wu X, 2016. Infrared radiation and microwave vacuum combined drying kinetics and quality of raspberry. *Journal of Food Process Engineering* 39:377-390.
- Tzempelikos DA, Vouros AP, Bardakas AV, Filios AE and Margaritis DP, 2014. Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Engineering* 3:79-85.
- Velić D, Planinić M, Tomas S and Bilić M, 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering* 64:97-102.

Journal of Food Researches/vol.31 No.2 2021/pp 155-171
<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>
DOI: 10.22034/FR.2021.44011.1785

The effect of hot air velocity on drying kinetics and physicochemical properties of raspberry fruit powder produced by foam mat method

M Ershadfarkar¹, S Dadashi^{2*}, J Deghannya³, M Khakbaz Heshmati²

Received: January 20, 2021

Accepted: February 20, 2021

¹MSc Graduated student, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran

²Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran

³Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran

*Corresponding author: E mail: Dadashis@tabrizu.ac.ir

Introduction: Due to the nutritional status and health effects of raspberry as a fruit rich in nutrients such as anthocyanins and phenolic compounds, the resulting powder can while have these compounds, increasing the variety and consumption of raspberry products (Si et al., 2016). However, because of its high moisture content and vulnerable texture, raspberry fruit corrupts very quickly and is difficult to keep fresh, even in cold storage conditions. Therefore, maintaining the quality of raspberry fruit after harvest and also increasing its storage time is one of the goals of raspberry growers around the world (Palonen and Weber, 2019). The drying process of fruits and vegetables prevents chemical and biochemical spoilage of the products and increases their shelf life by reducing the moisture content. However, some undesirable physical and chemical changes such as loss of color, texture and nutritional value may also occur during drying, which reduce consumer acceptance (Deghannya et al., 2017; Kayran and Doymaz, 2017). Foam mat drying is an alternative method of drum dryer, spray dryer and freezer dryer for the production of food powder. Food products become a stable foam by adding foaming agents and stirring in the presence or absence of foam stabilizers and are dried using different heat streams. Therefore, with the proper selection of foaming agents and drying conditions, a high quality powder can be obtained (Qadri et al., 2010; Javed et al., 2018). Despite the impact of air velocity on drying kinetics and other process parameters and consequently on the qualitative and functional characteristics of the dried product, few studies have been done on the effect of air velocity on foam mat drying of agricultural and food products. Therefore, according to the potentials of raspberry fruit and foam mat drying method, the aim of the present study was to evaluate the effect of drying air velocity (2 to 4 m/s) on the effective moisture diffusion coefficient, drying kinetics and also on the physicochemical properties of raspberry powder produced by the foam mat drying method.

Material and methods: Black raspberry fruit after being prepared from the local market in the north of the Iran (Gilan province) was stored at a temperature of 4°C. The raspberry fruit was first completely crushed by a food processor and passed through mesh number 30. Ovalbumin and methylcellulose with a concentration of 0.5% were used as foaming agent and foam stabilizing agent, respectively and added to the raspberry pulp. The resulting mixture was mixed with an electric stirrer at maximum speed for 10 minutes and the resulting foam was spread in a thickness of 7 mm on an aluminum plate. Drying was performed with a convective hot air dryer at a temperature of 70°C and an air velocity of 2 to 4 m/s. Drying kinetics and effective moisture diffusion coefficient, as well as physicochemical properties of raspberry powder such as bulk and tap density, powder flowability,

absolute density, water solubility index (WSI) and water absorption index (WAI), powder mass porosity, moisture content and color were evaluated according to the methods described by Dehghannya et al (Dehghannya et al., 2018, 2019).

Results and discussion: In the present study, the drying kinetics of raspberry by the foam mat drying method and the physicochemical properties of the resulting powder under the influence of air velocity were investigated. The results showed that the effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) was in the range of 1.391×10^{-8} to $1.723 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ and the increase of drying air velocity from 2 to 3 m/s and 3 to 4 m/s had a significant effect on it ($p < 0.05$). However, increasing the drying air velocity had no significant effect ($p > 0.05$) on moisture content, moisture ratio and drying rate of the product during drying. Changes in Carr index and Hausner ratio at different drying velocities were statistically significant ($p < 0.05$) and increasing the air velocity from 2 to 3 m/s reduced their values, which indicated the improvement of the powder flowability at air velocity of 3 m/s. Furthermore, the mean values of MC, WSI, WAI, Chroma index and brightness of raspberry powder significantly increased with increasing drying air velocity ($p < 0.05$). However, the bulk and tap density and absolute density and the overall color difference of raspberry powder decreased with increasing drying air velocity ($p > 0.05$).

Conclusion: The results of this study showed that the hot air velocity used in the drying process can be effective on the effective moisture diffusion coefficient and thus on the quality characteristics of the produced powder. So that, its effect on effective moisture diffusion coefficient, bulk and tap density, flowability, absolute density, WSI, WAI, moisture content and brightness of powder were significant. It should be noted, that the effect of air velocity in different values and in accordance with other process conditions, on different parameters is variable. Raspberry powder produced by foam mat drying method, due to its high anthocyanin content, can be used as a natural additive in dairy products, desserts, jams, jellies and other food products and the results of this study can increase the quality of the powder and improve its nutritional and functional properties by optimizing the drying process.

Keywords: Raspberry powder, Foam mat drying, Functional properties, Drying kinetics, Effective moisture diffusion coefficient