

# مطالعه تاثیر ضخامت فوم بر ضریب انتشار موثر رطوبت و سینتیک خشک شدن چغندر قرمز به روش فوم مت و ارزیابی ویژگی های کیفی و عملکردی محصول

گلناز بحریه<sup>۱</sup>، سعید داداشی<sup>۲\*</sup>، جلال دهقان‌نیا<sup>۳</sup>، حسین غفاری<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۷ / تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۶)

## چکیده

چغندر قرمز به عنوان منبعی سرشار از ترکیبات زیست فعال و بهبود دهنده سلامت، از پتانسیل بالایی جهت استفاده در طیف گسترده‌ای از مواد غذایی برخوردار است و پودر حاصل از آن نیز می‌تواند ضمن دارا بودن این ترکیبات، به عنوان یک آنتی‌اکسیدان و رنگ طبیعی در صنعت غذا مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش حاضر، پودر پالپ چغندر قرمز با استفاده از تکنیک خشک کردن فوم مت تولید شد. سینتیک خشک شدن و ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی و ریزساختاری پودر حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تهیه فوم، ۲٪ (وزنی/حجمی) آلومین به پالپ چغندر قرمز اضافه شده و برای مدت و سرعت مشخصی تحت همزنی قرار گرفت. فوم تهیه شده در ضخامت‌های ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر بر روی پلیت‌های آلومینیومی گسترده شده و سپس، در یک خشک‌کن کابینتی با هوای داغ در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ثابت ۱ متر بر ثانیه خشک گردید. نتایج نشان داد افزایش ضخامت فوم از ۵ به ۷ میلی‌متر تاثیر معناداری بر نسبت و محتوای رطوبت نداشته ولی سبب کاهش معنی‌دار ( $p < 0.05$ ) نرخ خشک کردن به میزان ۲۹/۶۳٪ گردید. ضریب انتشار موثر رطوبت به طور معناداری تحت تاثیر ضخامت فوم قرار گرفت و محدوده آن از  $5/550 \times 10^{-9}$  تا  $10^{-9} \times 7/388$  متر مربع بر ثانیه متغیر بود. همچنین با افزایش ضخامت فوم، به دلیل افزایش زمان خشک شدن و دناتوراسیون بیشتر پروتئین‌ها، یک روند افزایشی در شاخص کار و نسبت هوسنر و در نتیجه روند کاهش در جریان پذیری پودرها مشاهده شد. دانسیته توده ای و ضربه ای پودرها به دلیل تغییر محتوای رطوبت ناشی از افزایش در ضخامت فوم، به طور معناداری کاهش یافتند. ضخامت تأثیر معنی‌داری بر شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب نداشت. بررسی ریز ساختار پودرهای تولید شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان داد که با افزایش ضخامت فوم، ترک خوردگی و زبری سطحی ذرات پودر افزایش یافت. نتایج این مطالعه و مطالعات تکمیلی می‌تواند به بهینه سازی تولید پودر چغندر قرمز به عنوان رنگ دهنده طبیعی مواد غذایی و حفظ بهتر ویژگی های تغذیه ای و عملکردی آن منجر شود.

**کلید واژگان:** خشک کردن فوم مت، پودر چغندر قرمز، سینتیک خشک شدن، ضریب انتشار موثر رطوبت، خواص کاربردی

\* مسئول مکاتبات: Dadashis@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

چغندرقرمز با نام علمی *Beta vulgaris L.* متعلق به خانواده اسفناجیان<sup>۱</sup> یکی از سبزی‌های سستی و متداول در سراسر جهان است. این سبزی رنگی در مناطق معتدل عمدتاً در آمریکای شمالی، اروپا، آسیا و آفریقای شمالی کشت می‌شود [۱] و [۲]. از لحاظ تغذیه‌ای، چغندرقرمز به عنوان یک منبع غنی از مواد مغذی مهم نظیر فیبر، مواد معدنی (آهن، سلنیوم، پتاسیم، کلسیم، روی، فسفر و سدیم) و ویتامین‌ها (فولیک‌اسید، ویتامین‌های A, C, B6، نیاسین و بیوتین) تلقی می‌شود [۳]. همچنین، این محصول حاوی ترکیبات زیست‌فعال با ارزش نظیر کاروتنوئیدها، بتالائین‌ها، پلی‌فنول‌ها و ساپونین‌ها می‌باشد [۱ و ۳]. بتالائین‌ها رنگدانه‌های نیتروژنی محلول در آب هستند که از دو زیرواحد بتاسیانین‌ها (رنگدانه‌های قرمز- بنفش) و بتاگراتین‌ها (رنگدانه‌های زرد- نارنجی) تشکیل شده‌اند [۴]. امروزه، قرمزی چغندرقرمز یا بتانین (E-162) رایج‌ترین رنگدانه قرمز تا بنفش به‌کاررفته در صنعت غذا می‌باشد [۵]. چغندرقرمز به‌عنوان رنگ‌دهنده خوراکی قرمز برای بهبود رنگ رب گوجه‌فرنگی، سس، انواع دسرها، مربا، ژله، بستنی، شیرینی و غلات صبحانه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. علاوه بر این، ترکیبات چغندرقرمز می‌توانند در محصولاتی نظیر بسته‌بندی مواد غذایی ضد میکروبی فعال، محصولات آرایشی و در فرمولاسیون‌های دارویی فعال جهت درمان بیماری‌ها گنجانده شوند [۶]. در سال‌های اخیر، چغندرقرمز به‌عنوان یک ماده غذایی ارتقا‌دهنده سلامت توجه زیادی را به خود جلب کرده است و بتالائین و ترکیبات فنولیک موجود در چغندرقرمز دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ویژگی‌های ضد میکروبی، ضدتومور، ضد التهابی و سیتوتوکسیک می‌باشند [۱ و ۶]. با توجه به جایگاه تغذیه‌ای، سلامتی بخشی و کاربرد تکنولوژیکی چغندر قرمز به عنوان رنگ دهنده طبیعی مواد غذایی، تلاش برای افزایش ماندگاری، حفظ خواص کاربردی و تسهیل در جابه جایی، نگهداری و کاربرد این سبزی ارزشمند از جمله نیازهای صنعت غذا می‌باشد.

خشک‌کردن با هوای داغ رایج‌ترین روش مورد استفاده برای نگه‌داری مواد غذایی در صنعت فراوری است [۷]. این روش شامل قراردادن محصول در معرض جریان هوای داغ به‌منظور

حذف رطوبت می‌باشد. خشک‌کردن همرفتی معایبی از جمله سرعت خشک شدن پایین، به ویژه در دوره سرعت نزولی و کاهش کیفیت محصول به دلیل آسیب حرارتی را با خود به همراه دارد [۸]. همچنین، خشک‌کردن با هوای داغ باعث تغییرات کیفی نامطلوب در محصولات از جمله قهوه‌ای‌شدن، اکسیداسیون و همچنین، تخریب مواد مغذی و عطر و طعم محصول به‌دلیل فرارگرفتن طولانی‌مدت در معرض هوای داغ و یا زمان فرایند طولانی می‌شود که باعث آسیب محصول می‌گردد [۹ و ۱۰]. بنابراین، بهبود فرایند خشک‌کردن بدون آسیب رساندن به کیفیت محصول نهایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۱]. خشک‌کردن به روش فوم‌مت یک روش نسبتاً ساده است که حذف رطوبت از آبمیوه‌ها و پوره سبزیجات را تسهیل می‌کند [۱۲]. از مزایای اصلی این روش، خشک‌کردن سریع در دمای پایین‌تر و زمان خشک‌شدن کوتاه‌تر می‌باشد که این امر به حفظ مواد مغذی در سبزیجات کمک می‌کند [۱۳]. در خشک‌کردن به‌روش فوم‌مت، ماده مایع یا شبه‌مایع به‌واسطه هم‌زدن در حضور عوامل ایجادکننده کف خوراکی به یک فوم پایدار تبدیل می‌شود. سپس، فوم در یک سینی گسترده شده و با استفاده از تکنیک‌هایی نظیر خشک‌کردن با هوای داغ، خلأ، مایکروویو و انجمادی خشک می‌شود، تا زمانی که محتوای رطوبت محصول تا یک سطح خاص کاهش یابد [۱۴]. خشک‌کردن به‌روش فوم‌مت برای مواد غذایی نظیر میوه استار، آب سیب، پالپ انبه، موز، نارنگی، پالپ انگور فرنگی سیاه، سفیده تخم‌مرغ، قارچ دکمه‌ای، میگو و عصاره یاکون به‌کار برده شده است [۱۵]. مطالعات کمی در خصوص تأثیر ضخامت فوم در خشک‌کردن به روش فوم‌مت محصولات کشاورزی انجام گرفته است. فرانکو و همکاران (۲۰۱۷)، تأثیر ضخامت‌های مختلف فوم (۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر) و دماهای مختلف (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) بر سینتیک خشک‌کردن ریشه یاکون به‌روش فوم‌مت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت فوم ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت. استفاده از دماهای بالاتر و ضخامت‌های کمتر فوم سبب کاهش زمان فرایند شد [۱۶]. صلاحی و همکاران (۲۰۱۷)، تولید پودر پالپ میوه طالبی با استفاده از تکنیک خشک‌کردن فوم‌مت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیبی از دمای بالاتر (۷۰ درجه سلسیوس) و ضخامت کمتر فوم (۳ میلی‌متر) سبب کاهش زمان فرایند،

1. Chenopodiaceae
2. Active Antimicrobial Food Packaging

شده و در یک فریزر در دمای ۱۸- درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شد [۱۶]. پودر اوآلبومین از شرکت سیگما-آلدریچ آلمان خریداری و در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. مالتودکسترین با  $DE=18-20$  از شرکت پوران پودر سپاهان اصفهان و پودر متیل سلولز از شرکت سیگما-آلدریچ آلمان خریداری و در دمای اتاق نگهداری شدند. محلول ۵٪ متیل سلولز، مطابق روش توضیح داده شده توسط عباسی و عزیز پور (۲۰۱۶) تهیه شد [۱۴]. جهت تهیه فوم، اوآلبومین با غلظت ۲٪ (وزنی/حجمی)، محلول متیل سلولز (۵٪) با غلظت ۱٪ (وزنی/حجمی) و مالتودکسترین با غلظت ۸٪ (وزنی/حجمی) به ترتیب به عنوان عوامل کف‌ساز، پایدارکننده و حامل<sup>۷</sup> به پالپ چغندرقرمز دیفراسه شده اضافه شدند. ترکیب حاصل در یک بشر یک لیتری توسط همزن الکتریکی (Moulinex، مدل HM-615، ساخت فرانسه) با حداکثر سرعت (سرعت دوران شماره ۵) به مدت ۱۲ دقیقه هم‌زده شد [۱۳]. سپس، کف حاصله در ضخامت‌های ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر در پلیت‌های آلومینیومی گسترده شد [۱۴]. جهت رسیدن به ضخامت‌های ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر، مقدار مشخصی از فوم، بسته به دانسیته آن در پلیت‌های آلومینیومی ریخته شد. ضخامت فوم با استفاده از حاصل‌ضرب دانسیته فوم در سطح مقطع پلیت آلومینیومی بدست آمد [۱۷].

## ۲-۲- خشک کردن

از یک خشک‌کن هوای داغ همرفتی  $(34/5 \times 34/5 \times 273 =$  ارتفاع  $\times$  عرض  $\times$  طول) دارای ۶ عدد هیتر ۵ کیلووات، مجهز به دماسنج و رطوبت‌سنج در قسمت خروجی و ورودی با قابلیت تنظیم سرعت و دمای هوا استفاده شد (شکل ۱). خشک کردن توسط خشک‌کن هوای داغ کنوکسیون در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه انجام پذیرفت. افت رطوبت به وسیله وزن کردن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه بر روی یک ترازوی الکترونیکی (با دقت ۰/۰۱  $\pm$  گرم) ارزیابی شد. معیار تکمیل فرایند خشک کردن، ثبات وزن نمونه‌ها در سه اندازه‌گیری متوالی بود [۱۶]. پس از اتمام فرایند، نمونه‌ها توسط کاردک مخصوص از سطح پلیت خراش داده شده و سریعاً توسط هاون چینی آسیاب شدند. پودر بدست آمده بسته‌بندی و تا انجام آنالیزهای بعدی در دمای ۴

محتوای رطوبت و فعالیت آب شد [۱۵]. دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر ضخامت فوم بر تولید پودر آلبومین طی فرایند خشک کردن به روش فوم‌مت را مورد ارزیابی قرار دادند. افزایش ضخامت فوم سبب افزایش شاخص جذب آب<sup>۱</sup> و کاهش نرخ خشک کردن و شاخص حلالیت در آب<sup>۲</sup> گردید [۱۷].

با توجه به آنچه که بیان شد و با توجه به پتانسیل‌های چغندر قرمز و روش خشک کردن فوم مت، هدف از پژوهش حاضر، استفاده از خشک کردن فوم مت به عنوان یک روش نسبتاً جدید، ساده، در عین حال موثر و جایگزینی برای روش‌های پر هزینه نظیر خشک کردن پاششی به منظور تولید پودر پالپ چغندر قرمز بود. در این راستا، ارزیابی تأثیر ضخامت فوم (۵ تا ۷ میلی‌متر) با ۲٪ اوآلبومین در حین خشک شدن در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه بر ضریب انتشار موثر رطوبت و سینتیک خشک شدن و همچنین ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی (دانسیته توده‌ای<sup>۳</sup>، دانسیته ضربه‌ای<sup>۴</sup>، جریان‌پذیری<sup>۵</sup>، شاخص حلالیت در آب، شاخص جذب آب، محتوای رطوبت و رنگ) و ریزساختار پودرهای تولیدی انجام پذیرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد اولیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

چغندرقرمز (*Beta vulgaris L.*) از گونه دیترویت<sup>۱</sup> از یک بازار محلی در تبریز خریداری شد. چغندرهای شسته شده و پس از پوست‌گیری با چاقو، با استفاده از یک کاتر دستی به صورت قطعات مکعبی کوچک برش داده شدند. قطعات چغندرقرمز در داخل یک بن‌ماری (مدل WM22، فن‌آزمایشگر، ساخت ایران) در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۷ دقیقه آنزیم‌بری شده و به سرعت در آب یخ به مدت ۲ دقیقه غوطه‌ور شدند [۱۸]. سپس، با استفاده از یک گوشت‌کوب برقی (Moulinex، مدل DD8558 Slim Force، ساخت فرانسه) به مدت ۱۰ دقیقه آسیاب شدند تا پالپ همگنی بدست آمد [۱۳]. پالپ حاصل در داخل کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی

1. Water Absorption Index (WAI)
2. Water Solubility Index (WSI)
3. Bulk Density
4. Tapped Density
5. Flowability
6. Detroit

7. Carrier Agent

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

در این رابطه MR نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $D_{eff}$  ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $m^2 s^{-1}$ ) و  $L$  ضخامت لایه فوم (متر) و  $t$  زمان فرایند خشک کردن (s) می باشد. برای زمان های طولانی تر خشک کردن، فقط اولین جمله این سری در نظر گرفته می شود و معادله بالا به صورت رابطه (4) ساده می شود.

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

با گرفتن ln از طرفین معادله خواهیم داشت:

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

حال می توان ضریب انتشار مؤثر رطوبت را از طریق شیب خط  $\ln(MR)$  در مقابل زمان فرایند خشک کردن محاسبه کرد [17].

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

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

## ۲-۴-۲-۴- آزمایش های فیزیکوشیمیایی پودر چغندر

### قرمز

#### ۲-۴-۲-۱- دانسیته توده ای و ضربه ای

دانسیته توده ای ( $\rho_B, g cm^{-3}$ ) از طریق نسبت جرم به حجم اشغال شده توسط ۲ گرم از پودر در استوانه مدرج ۱۰ میلی لیتری، بدون ضربه زدن به آن محاسبه گردید. دانسیته ضربه ای ( $\rho_T, g cm^{-3}$ ) نیز از نسبت جرم پودر به حجم اشغال شده توسط پودر پس از ضربه زدن به استوانه مدرج حاوی پودر (۱۰ بار ضربه از ارتفاع ۱۵ سانتی متر) محاسبه شد [12].

#### ۲-۴-۲-۲- جریان پذیری پودر

قابلیت جریان یافتن پودر توسط شاخص کار<sup>۲</sup> و نسبت هوسنر<sup>۳</sup>

درجه سلسیوس نگهداری شد [17].

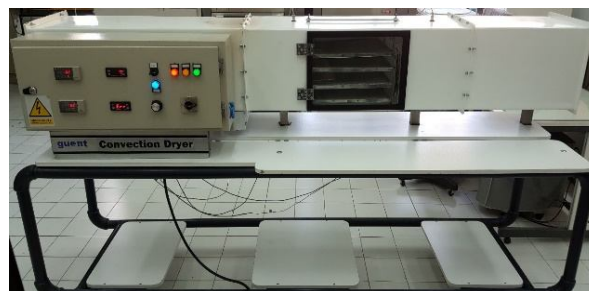


Fig 1 The experimental dryer used in this study.

## ۲-۳-۳- سینتیک خشک شدن

### ۲-۳-۱- نسبت رطوبت

باتوجه به داده های حاصل از تغییرات وزنی، رطوبت فوم در هر لحظه بر مبنای خشک (d.b) برآورد شد. نسبت رطوبت (MR) بدون بعد با استفاده از رابطه (1) محاسبه شد [16 و 17].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

در این فرمول،  $M_t$ ،  $M_0$  و  $M_e$  به ترتیب محتوای رطوبت در زمان  $t$ ، محتوای رطوبت اولیه و محتوای رطوبت تعادلی بر مبنای خشک (d.b) می باشند. به دلیل ناچیز بودن مقدار  $M_e$  در مقابل  $M_0$  و  $M_t$  قابل صرف نظر کردن می باشد.

### ۲-۳-۲- نرخ خشک کردن

نرخ خشک کردن (DR) از طریق رابطه (2) به دست آمد [16 و 17].

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

در این رابطه،  $M_{t+\Delta t}$  محتوای رطوبت بر مبنای خشک (d.b) در زمان  $t+\Delta t$ ،  $t$  زمان (min) و  $\Delta t$  تفاوت زمانی (min) است.

### ۲-۳-۳- ضریب انتشار مؤثر رطوبت

باتوجه به اینکه طی فرایند خشک کردن، انتشار پدیده غالب انتقال رطوبت از مرکز به سطح فوم در نظر گرفته می شود، میزان دفع رطوبت محصول بر اساس قانون دوم فیک، براساس رابطه (3) که به نام معادله کرک<sup>۱</sup> شناخته شده است، محاسبه گردید [19].

2. Carr Index (CI)  
3. Hausner Ratio (HR)

1. Crank

ویژگی‌های ریزساختاری سطح ذرات پودر پالپ چغندرقرمز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۱</sup> (مدل S-4160، شرکت هیتاچی، ژاپن) مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از تثبیت نمونه‌ها بر روی صفحه‌های آلومینیومی و روکش‌دهی ذرات پودر با استفاده از لایه نازکی از طلا، به‌منظور هادی‌سازی نمونه‌ها در دستگاه اسپاترینگ رومیزی<sup>۲</sup> (مدل DSR1، ساخت ایران)، نمونه‌ها به دستگاه میکروسکوپ الکترونی منتقل شده و در مقیاس ۵ و ۵۰ میکرومتر در ولتاژ ۲۰ کیلووات و با بزرگ‌نمایی ۶۰۰× عکس‌برداری شد.

## ۲-۶- طرح آماری آزمایش‌ها

در این پژوهش، داده‌های حاصل از آزمایش به‌صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی<sup>۳</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت و میانگین داده‌های حاصل از تکرارهای مختلف در نظر گرفته شد. مقایسه میانگین بر اساس آزمون دانکن<sup>۴</sup> با سطح اطمینان ۹۵٪ ( $p < 0.05$ ) انجام گرفت. تجزیه و تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳) صورت گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- منحنی‌های سینتیک خشک‌شدن

#### ۳-۱-۱- محتوای رطوبت

تغییرات محتوای رطوبت بر مبنای خشک در مقابل زمان خشک‌شدن در ضخامت‌های مختلف فوم در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، محتوای رطوبت نمونه‌ها در طول خشک‌شدن به‌صورت مداوم و نمایی کاهش یافت و این کاهش با افزایش ضخامت فوم با روند آهسته‌تری رخ داد. صلاحی و همکاران (۲۰۱۵) و دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸) نیز بیان کردند که کاهش ضخامت فوم سبب شتاب گرفتن میزان خروج رطوبت از فوم گردید [۱۷ و ۲۲]. در مطالعه کووالسکی و لچتاچسکا (۲۰۱۵) تغییرات محتوای رطوبت قطعات چغندر قرمز به ضخامت ۳ میلی‌متر، طی خشک‌شدن در دمای ۶۵ درجه سلسیوس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه به لحاظ نزولی بودن و روند کلی

از طریق روابط (۸ و ۹) محاسبه شد [۲۰ و ۲۱].

$$CI = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_T} \times 100 \quad (8)$$

$$HR = \frac{\rho_T}{\rho_B} \quad (9)$$

در این روابط،  $\rho_B$  دانسیته توده‌ای ( $\text{g cm}^{-3}$ ) و  $\rho_T$  دانسیته ضربه‌ای ( $\text{g cm}^{-3}$ ) می‌باشد.

**Table 1** Classification of powder flowability based on CI and HR values [12, 21].

| Flow property   | CI (%) | HR (dimensionless) |
|-----------------|--------|--------------------|
| Excellent       | 0-10   | 1-1.11             |
| 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              |

۲-۴-۳- شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب  
شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب پودرها مطابق روش توضیح داده شده توسط آسوکاپندیان و همکاران (۲۰۱۶) محاسبه گردید [۱۲].

#### ۲-۴-۴- محتوای رطوبت پودر بر مبنای مرطوب

محتوای رطوبت پودرها با استفاده از روش آن ( $105 \pm 2^\circ\text{C}$ ) و معادله (۱۰) محاسبه گردید [۲۰].

$$MC\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (10)$$

در این رابطه، MC درصد رطوبت و  $W_1$  و  $W_2$  وزن پودر به‌ترتیب قبل و بعد از آن‌گذاری می‌باشند.

#### ۲-۴-۵- ارزیابی رنگ

پودر چغندرقرمز در پلیت ریخته شده و عکس‌برداری از نمونه‌ها توسط دوربین دیجیتال (Canon، مدل S90، ساخت ژاپن) با رزولوشن ۱۰ مگاپیکسل در یک هانت‌رلپ انجام شد. پارامترهای رنگی هر یک از نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ (CC 2017.1) محاسبه شدند. این پارامترها شامل میزان روشنایی یا  $L^*$  از رنگ سیاه (۰) تا سفید (۱۰۰)، میزان قرمزی یا  $a^*$  از سبز تا قرمز و میزان زردی یا  $b^*$  از آبی تا زرد می‌باشند [۱۷].

## ۲-۵- بررسی ویژگی‌های ریزساختاری و

### مورفولوژی ذرات پودر

1. Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)
2. Desk Sputter Coater
3. Completely Randomized Design
4. Duncan

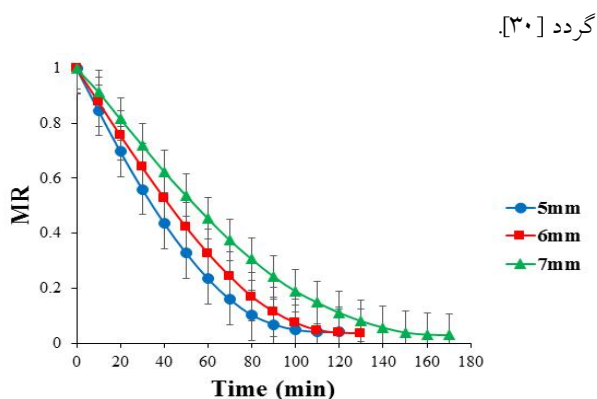


Fig 3 Effect of foam thickness on moisture ratio.

### ۳-۱-۳- نرخ خشک کردن

شکل (۴) نشان‌دهنده منحنی نرخ خشک کردن در مقابل زمان خشک کردن در ضخامت‌های مختلف فوم است. همان‌طور که مشخص است، خشک کردن در دوره نزولی رخ داده و انتشار مکانیزم کنترل‌کننده نرخ خشک کردن بود [۲۲]. همچنین، افزایش ضخامت فوم نرخ خشک کردن را کاهش و در نتیجه زمان فرایند را افزایش داد. جدول (۲) مقادیر میانگین نرخ خشک کردن در ضخامت‌های مختلف فوم حین خشک کردن را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، افزایش ضخامت از ۵ به ۷ میلی‌متر مقدار میانگین نرخ خشک کردن را به میزان ۲۹/۶۳٪ به‌طور معنی‌داری ( $p < 0/05$ ) کاهش داد. صلاحی و همکاران (۲۰۱۵) و دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)، نیز در تطابق با داده‌های حاصل از این پژوهش، نرخ بالاتر خشک کردن را در ضخامت‌های کم‌تر فوم گزارش کردند [۱۷ و ۲۲]. افزایش ضخامت لایه فوم از انتشار رطوبت از قسمت داخلی به سمت سطح کاسته و در نتیجه، تبخیر رطوبت به‌کندی صورت گرفته و نرخ خشک کردن کاهش می‌یابد [۱۷]. علاوه‌براین، انتقال حرارت در لایه‌های نازک کارآمدتر است و در نتیجه نفوذ حرارت سریع می‌تواند منجر به انتشار رطوبت در یک زمان کوتاه‌تر شود [۱۶].

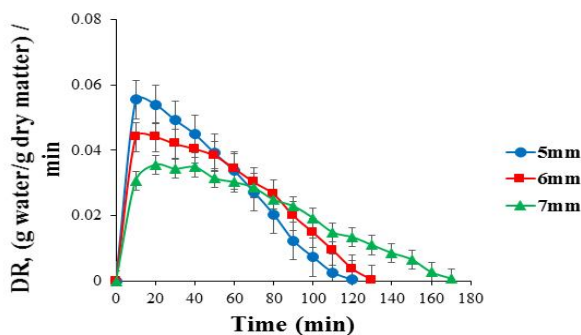


Fig 4 Effect of foam thickness on drying rate.

تغییرات، با نتایج مطالعه حاضر قابل انطباق بود؛ با این تفاوت که با توجه به حفظ انسجام ساختاری نمونه‌ها، شیب تغییرات کندتر بوده و بعد از حدود ۱۸۰ دقیقه مقدار محتوای رطوبت به ثبات می‌رسد [۲۸]. مطالعه شاجیسکا و همکاران (۲۰۲۰) نیز صرف نظر از سایر عوامل و شرایط، نتیجه عدم تبدیل بافت محصول به حالت فوم و تاثیر آن بر سینتیک خشک شدن را به وضوح نشان داد [۲۹]. مقادیر میانگین محتوای رطوبت در ضخامت‌های مختلف فوم حین خشک شدن در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت از ۵ به ۷ میلی‌متر، مقدار میانگین محتوای رطوبت به میزان ۳/۳۶٪ به‌طور غیرمعنی‌داری ( $p > 0/05$ ) افزایش یافت.

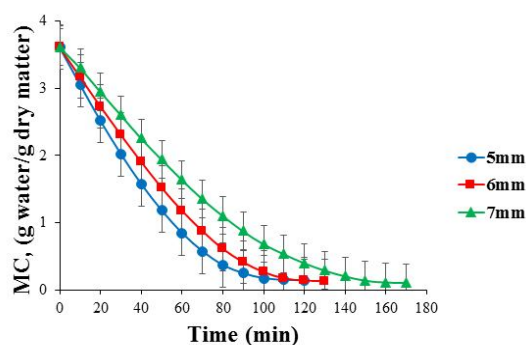


Fig 2 Effect of foam thickness on moisture content.

### ۳-۱-۲- نسبت رطوبت

منحنی‌های نسبت رطوبت در ضخامت‌های مختلف فوم در شکل (۳) نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که با گذشت زمان نسبت رطوبت کاهش یافت و این کاهش در ضخامت‌های بالاتر فوم با روند آهسته‌تری اتفاق افتاد. با افزایش ضخامت، خروج رطوبت از لایه فوم در زمان‌های طولانی‌تری اتفاق می‌افتد [۷]. مقادیر نسبت رطوبت در ضخامت‌های مختلف فوم در حین خشک کردن در جدول (۲) گزارش شده است. با توجه به این جدول، با افزایش ضخامت از ۵ به ۷ میلی‌متر، مقدار میانگین نسبت رطوبت به میزان ۴/۲۴٪ به‌طور غیرمعنی‌داری ( $p > 0/05$ ) افزایش یافت. این یافته‌ها موافق با نتایج حاصل از ارزیابی خشک کردن به روش فوم‌مت آبلیمو در ضخامت‌های مختلف فوم توسط دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸) است [۱۷]. مقایسه نتایج بدست آمده در این مطالعه با نتایج مطالعات قبلی، از جمله مطالعه فیگیل (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که تبدیل چغندر قرمز به حالت فوم، ضمن ایجاد بافت همگن، منجر به تسریع در روند خروج رطوبت و در نتیجه کاهش مدت زمان قرارگیری محصول در معرض هوای داغ می‌شود.

## ۳-۱-۴- ضریب انتشار مؤثر رطوبت

ضریب انتشار مؤثر رطوبت، انتقال رطوبت در داخل مواد غذایی، انتشار مولکولی، انتشار بخار و مایع، انتشار هیدرودینامیک و سایر مکانیزم‌های انتقال جرم را توضیح می‌دهد [۱۲]. شکل (۵) نشان‌دهنده لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک‌کردن است. همان‌طور که مشخص است، مقادیر  $\ln(MR)$  در ضخامت‌های پایین‌تر روند کاهشی سریع‌تری از خود نشان داد و شیب خط  $\ln(MR)$  در مقابل زمان بیش‌تر بود. مقادیر میانگین ضریب انتشار مؤثر رطوبت در ضخامت‌های مختلف فوم حین خشک‌کردن در جدول (۲) ارائه شده است. باتوجه به این جدول، ضریب انتشار مؤثر رطوبت با افزایش ضخامت به طور معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) افزایش یافت. تغییرات ضریب انتشار مؤثر رطوبت در بازه  $10^{-9}$  تا  $7/388 \times 10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه بود. این نتیجه در تطابق با نتایج حاصل از پژوهش‌های صلاحی و همکاران (۲۰۱۵)، فرانکو و همکاران (۲۰۱۷) و دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸) بود. این پژوهشگران، افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت با افزایش ضخامت لایه فوم را به

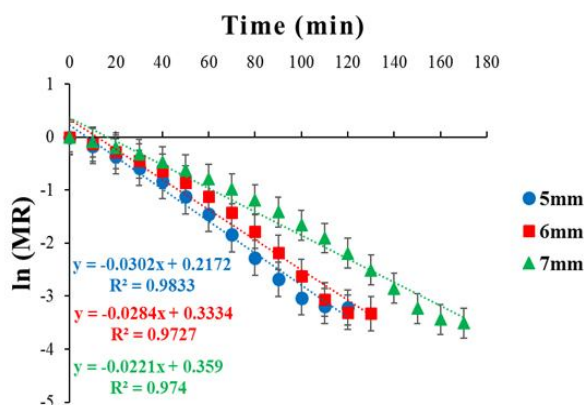


Fig 5 Effect of foam thickness on  $\ln(MR)$  vs drying time.

Table 2 Mean values of moisture content, moisture ratio, drying rate and effective diffusivity of red beetroot pulp foams at various foam thicknesses.

| Thickness (mm) | MC (g water/g dry matter) | MR (dimensionless)  | DR (g water/g dry matter)/ min | $D_{eff}$ ( $m^2/s$ )                             |
|----------------|---------------------------|---------------------|--------------------------------|---|
| 5              | $1.279^a \pm 0.140$       | $0.354^a \pm 0.004$ | $0.027^c \pm 0.000$            | $5.550 \times 10^{-9a} \pm 4.859 \times 10^{-10}$ |
| 6              | $1.326^a \pm 0.050$       | $0.367^a \pm 0.014$ | $0.023^b \pm 0.002$            | $6.451 \times 10^{-9b} \pm 4.307 \times 10^{-10}$ |
| 7              | $1.332^a \pm 0.021$       | $0.369^a \pm 0.006$ | $0.019^a \pm 0.001$            | $7.388 \times 10^{-9c} \pm 1.753 \times 10^{-10}$ |

\*The same letters in the same column indicate there were no significant different ( $p > 0.05$ ) between treatments according to Duncan test. Number of replicates:  $n = 3$ .

رفتار بسته‌بندی پودرها به‌وسیله بسیاری از عوامل دیگر از جمله شکل، توزیع و اندازه ذرات، زبری سطح یا مورفولوژی و چسبندگی تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۱]. همان‌طور که در جدول (۳) مشخص است، با افزایش ضخامت فوم از ۵ به ۷ میلی‌متر، دانسیته توده‌ای و ضریب‌های پودر به ترتیب به میزان  $3/92$  و  $2/85$ ٪ کاهش معنی‌دار ( $p < 0.05$ ) از خود نشان دادند. علت این امر به افزایش محتوای رطوبت پودر با افزایش ضخامت فوم نسبت داده می‌شود. دانسیته پودرها به محتوای رطوبت و اندازه ذرات بستگی دارد. با افزایش میزان رطوبت پودر، تمایل ذرات پودر برای به هم چسبیدن افزایش یافته و فضای خالی بیشتری بین آنها وجود خواهد داشت که همین امر

## ۳-۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر

## ۳-۲-۱- دانسیته توده‌ای و ضریب‌های

دانسیته‌های توده‌ای و ضریب‌های اندازه‌گیری‌های فیزیکی کم‌هزینه جهت پیش‌بینی کیفیت ذرات پودر می‌باشند. دانسیته توده‌ای تعیین‌کننده سهولت بازجذب آب، بسته‌بندی، حمل و نقل و نگهداری غذاهای پودری می‌باشد [۲۰]. در طی جابه‌جایی و حمل و نقل، پودرها نشست می‌کنند که منجر به افزایش دانسیته توده‌ای می‌گردد. بنابراین، دانسیته ضربه‌ای اصطلاح مناسب‌تری جهت استفاده در این موارد است که به معنی افزایش دانسیته توده‌ای پس از ضربه مکانیکی است. همچنین، دانسیته ضربه‌ای رفتار بسته‌بندی پودرها را نشان می‌دهد، اگرچه

[۲۳]. آنالیز آماری داده‌ها نشان داد که افزایش ضخامت فوم تأثیر معنی‌داری بر شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب نداشت (جدول ۳). حلالیت یک پودر توسط خواص مواد خام و خواص پودر نظیر محتوای رطوبت، اندازه و حالت فیزیکی ذره (حالت آمورف محلول‌تر است) تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۵]. بازجذب آب نیز به تخلخل، محتوای کل مواد جامد، حجم، ژلاتیناسیون و بافت پودر وابسته است [۲۴]. دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)، در ارزیابی پودر آلبیموی تولیدشده به روش فوم‌مت گزارش کردند که با افزایش ضخامت از ۴ به ۶ میلی‌متر شاخص حلالیت در آب کاهش و شاخص جذب آب افزایش یافت. این محققان، این امر را به افزایش زمان خشک‌شدن با افزایش ضخامت فوم و در نتیجه دناتوراسیون بیشتر پروتئین‌ها نسبت دادند [۱۷].

### ۳-۲-۴- محتوای رطوبت پودر بر مبنای مرطوب

رطوبت تعیین‌کننده جریان‌پذیری، چسبناکی و پایداری پودر به دلیل تأثیر آن بر روی رفتار انتقال شیشه‌ای و کریستالیزاسیون می‌باشد [۲۱]. همان‌طور که در جدول (۳) مشخص است، افزایش ضخامت فوم از ۵ به ۷ میلی‌متر سبب افزایش معنی‌دار ( $p < 0.05$ ) محتوای رطوبت فوم به میزان ۸/۸٪ گردید. در تطابق با نتایج این پژوهش، فرانکو و همکاران (۲۰۱۶) و صلاحی و همکاران (۲۰۱۷)، گزارش کردند که با افزایش ضخامت فوم، محتوای رطوبت نهایی پودر افزایش یافت. این پژوهشگران بیان کردند که با افزایش ضخامت فوم، به دلیل افزایش زمان خشک‌شدن و احتمالاً ساختار متلاشی فوم‌ها و بنابراین، ساختار متخلخل ضعیف، خشک‌شدن به‌سختی صورت می‌گیرد که موجب حفظ آب بیشتر در فوم‌های خشک می‌شود [۱۵ و ۲۳].

سبب افزایش حجم توده‌ای و در نتیجه کاهش دانسیته توده‌ای پودر خواهد شد [۱۷].

### ۳-۲-۳- قابلیت جریان یافتن

جریان پودر به صورت حرکت نسبی ذرات توده‌ای در میان ذرات مجاور یا در امتداد سطح دیواره ظرف تعریف می‌شود. قابلیت جریان پودر یک خاصیت مهم است که توسط توزیع اندازه ذرات، زاویه ریپوز و محتوای رطوبت پودر کنترل می‌شود [۲۰]. افزایش ضخامت فوم از ۵ به ۷ میلی‌متر سبب افزایش معنی‌دار ( $p < 0.05$ ) شاخص کار و نسبت هوسنر به ترتیب به میزان ۷/۷۶٪ و ۱/۰۷٪ و در نتیجه کاهش جریان‌پذیری پودر گردید (جدول ۳). افزایش ضخامت فوم سبب افزایش زمان خشک‌کردن و دناتوراسیون بیشتر پروتئین‌ها و در نتیجه، کاهش قابلیت جریان پودر می‌گردد [۲۳]. در تطابق با نتایج این پژوهش، دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)، نیز روند افزایشی در شاخص کار و نسبت هوسنر با افزایش ضخامت فوم مشاهده کردند [۱۷]. جریان‌پذیری پودر عمدتاً به وسیله ترکیب سطح پودر نظیر رطوبت، پروتئین، چربی و فیبر تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۱].

### ۳-۲-۳- شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب

انحلال قابل اعتمادترین معیار جهت ارزیابی رفتار پودر در محلول آبی است و شاخص حلالیت در آب، میزان مواد محلول رها شده از نمونه را اندازه‌گیری می‌کند [۱۲ و ۱۵]. پودر مناسب پودری است که در طی جذب مجدد آب سریعاً و به طور کامل رطوبت جذب کرده و بدون تشکیل کیک پخش شود [۲۴]. شاخص جذب آب نیز به توانایی ماده خشک‌شده در میزان جذب آب اطلاق داده می‌شود که مستقیماً با ظرفیت هیدراتاسیون آن در ارتباط است. مواد پودری با شاخص جذب آب بالا، توانایی جذب آب حتی در دماهای کمتر را دارند

**Table 3** Effect of foam thickness on the qualitative properties of the red beetroot pulp powder.

| Property                             | Thickness (mm)              |                              |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                                      | 5                           | 6                            | 7                           |
| Bulk density (gr/cm <sup>3</sup> )   | 0.561 <sup>c</sup> ± 0.003  | 0.550 <sup>b</sup> ± 0.003   | 0.539 <sup>a</sup> ± 0.003  |
| Tapped density (gr/cm <sup>3</sup> ) | 0.632 <sup>c</sup> ± 0.003  | 0.624 <sup>b</sup> ± 0.002   | 0.614 <sup>a</sup> ± 0.002  |
| CI (%)                               | 11.234 <sup>a</sup> ± 0.105 | 11.858 <sup>ab</sup> ± 0.462 | 12.106 <sup>b</sup> ± 0.407 |
| HR (dimensionless)                   | 1.126 <sup>a</sup> ± 0.002  | 1.135 <sup>ab</sup> ± 0.006  | 1.138 <sup>b</sup> ± 0.003  |
| WSI (%)                              | 77.033 <sup>a</sup> ± 0.709 | 76.400 <sup>a</sup> ± 1.082  | 75.367 <sup>a</sup> ± 0.651 |
| WAI (dimensionless)                  | 2.994 <sup>a</sup> ± 0.623  | 3.418 <sup>a</sup> ± 0.425   | 3.659 <sup>a</sup> ± 0.481  |
| Moisture content (%)                 | 6.087 <sup>a</sup> ± 0.078  | 6.282 <sup>ab</sup> ± 0.163  | 6.627 <sup>b</sup> ± 0.317  |

\*Different superscript letters <sup>a-c</sup> in the same rows indicate a significant difference ( $p < 0.05$ ) between treatments according to the Duncan test. Number of replicates: n = 3.



## ۳-۲-۵- پارامترهای رنگی

رنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنجش جذابیت حسی و کیفیت محصول است که تأثیر زیادی روی مطلوبیت و قیمت نهایی آنها دارد و باعث درک مصرف‌کننده از کیفیت، تازگی، ایمنی و در نهایت قابلیت فروش آن می‌شود [۲۴] و [۲۶]. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، با افزایش ضخامت فوم مقدار پارامتر رنگی  $L^*$  به طور غیرمعنی‌داری کاهش یافت. میزان روشنایی در مواد غذایی به فاکتورهای متعددی مثل غلظت و نوع پیگمنت‌های موجود، محتوای رطوبت و میزان رطوبت در سطح وابسته است [۲۳]. در تطابق با نتایج این پژوهش، دهقان‌نیا و همکاران (۲۰۱۸)،

مشاهده کردند که با افزایش ضخامت فوم از ۴ به ۶ میلی‌متر، میزان روشنایی کاهش یافت [۱۷]. فرانکو و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کردند که میزان روشنایی ( $L^*$ ) با طولانی‌تر شدن زمان فرایند کاهش می‌یابد [۲۳]. افزایش ضخامت فوم از ۵ به ۷ میلی‌متر سبب کاهش معنی‌دار ( $p < 0.05$ ) پارامتر  $a^*$  به میزان ۱۴/۶۰۲٪ گردید. این کاهش ممکن است به دلیل افزایش زمان فرایند و در معرض‌گیری بیشتر فوم در دمای بالا طی خشک‌کردن و در نتیجه تخریب بتالائین باشد. همچنین، افزایش ضخامت فوم سبب کاهش غیرمعنی‌دار ( $p > 0.05$ ) میزان زردی ( $b^*$ ) گردید (جدول ۴).

**Table 4** Color parameters of foam mat dried red beetroot pulp powder at various foam thicknesses.

| Color coordinates | Thickness (mm)              |                              |                             |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                   | 5                           | 6                            | 7                           |
| $L^*$             | 37.704 <sup>a</sup> ± 3.152 | 35.806 <sup>a</sup> ± 3.213  | 34.671 <sup>a</sup> ± 2.899 |
| $a^*$             | 33.406 <sup>b</sup> ± 1.550 | 31.333 <sup>ab</sup> ± 1.041 | 28.528 <sup>a</sup> ± 1.634 |
| $b^*$             | 5.233 <sup>a</sup> ± 0.252  | 5.011 <sup>a</sup> ± 0.448   | 4.622 <sup>a</sup> ± 0.601  |

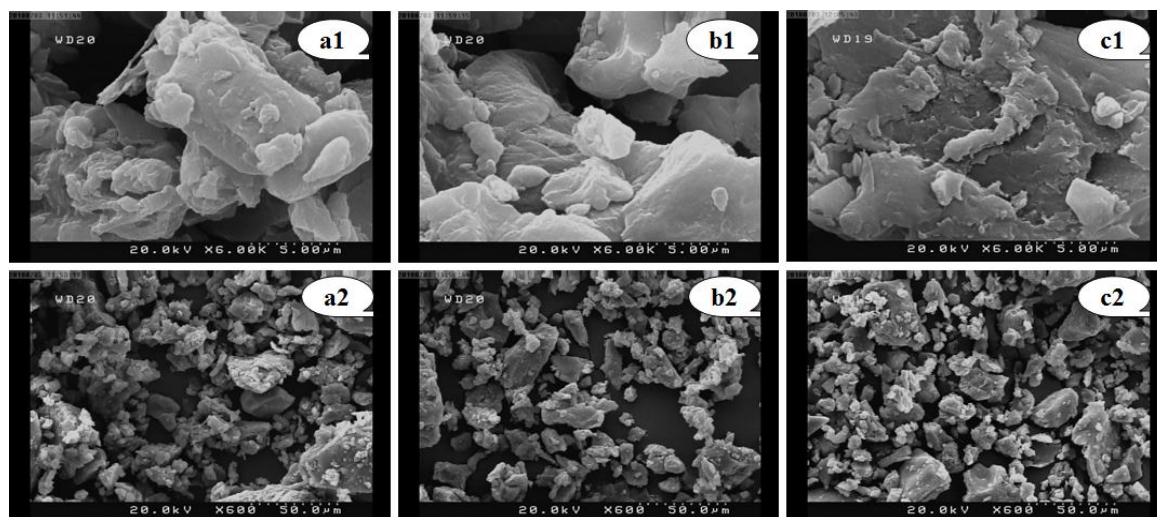
\*The same letters in the same raw indicate there were no significant different ( $p > 0.05$ ) between treatments according to Duncan test. Number of replicates:  $n = 3$ .

## ۳-۳- ویژگی‌های ریزساختاری و مورفولوژی

## ذرات پودر پالپ چغندر قرمز

ریزساختار ذرات عامل مهمی است که پایداری و جریان‌پذیری پودر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل، اندازه و توزیع اندازه ذرات همه نقش مهمی در فراوری، جابه‌جایی و ماندگاری پودرهای غذایی ایفا می‌کنند و به شدت تحت تأثیر فرایند خشک‌کردن به‌کاررفته، شرایط و نوع پودر قرار می‌گیرند [۲۱]. سطح ذره بسته به فرایندهای ساخت پودر می‌تواند چروکیده، چین‌خورده، ترک‌خورده و دندان‌دار باشد [۲۷]. شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی پودر پالپ چغندر قرمز در مقیاس‌های ۵ ( $a_1$  to  $c_1$ ) و ۵۰ ( $a_2$  to  $c_2$ ) میکرومتر را در ضخامت‌های ۵ (a)، ۶ (b) و ۷ (c) میلی‌متر نشان می‌دهد. باتوجه به این تصاویر، با افزایش ضخامت فوم، ترک‌خوردگی و زبری سطح ذرات افزایش یافت؛ اما در حالت

کلی، ضخامت تأثیر محسوسی بر مورفولوژی ذرات پودر نداشت. همه نمونه‌ها یک ساختار متخلخل و نامنظم نشان دادند. در تطابق با نتایج این پژوهش، فرانکو و همکاران (۲۰۱۶) در ارزیابی ویژگی‌های ریزساختاری پودر عصاره یاکون تولیدشده به‌روش فوم‌مت، مشاهده کردند که مورفولوژی ذرات تحت تأثیر غلظت آبمیوه و شرایط خشک‌کردن به‌کاررفته قرار نگرفت و عدم یکنواختی برای همه نمونه‌ها وجود داشت [۲۳]. با توجه به عدم تأثیر معنی‌دار ضخامت فوم بر شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب و آنچه که از بررسی ریزساختار پودرها بدست آمد، می‌توان انطباق قابل قبولی بین این دو برقرار نمود. در مطالعه سینگ و هاتان (۲۰۱۷) بر روی پودر حاصل از خشک کردن پاششی عصاره چغندر قرمز نیز نتایج حاصل از ریزساختار پودرها حاکی از عدم تغییر معنادار در مورفولوژی ذرات و در نتیجه حلالیت پودرها بود [۳۱].



**Fig 6** FE-SEM images of the foam-mat dried red beetroot pulp powder particles at scale of 5  $\mu\text{m}$  (a<sub>1</sub> to c<sub>1</sub>), and 50  $\mu\text{m}$  (a<sub>2</sub> to c<sub>2</sub>), at foam thicknesses of [a] 5mm (a<sub>1</sub> to a<sub>2</sub>); [b] 6mm (b<sub>1</sub> to b<sub>2</sub>); and [c] 7mm (c<sub>1</sub> to c<sub>2</sub>).

- [3] Kohajdová, Z., Karovičová, J., Kuchtová, V., Lauková, M. 2018. Utilization of beetroot powder for bakery applications. *Chemical Papers*, 72(6), 1507-1515.
- [4] Marszałek, K., Kryzanowska, J., Wozniak, Ł., Skałska, S. 2017. Kinetic modelling of polyphenol oxidase, pectin esterase, polygalacturonase, degradation of the main pigments and polyphenols in beetroot juice during high pressure carbon dioxide treatment. *LWT-Food Science and Technology*, 85, 412-417.
- [5] Deladino, L., Alvarez, I., De Ancos, B., Sánchez-Moreno, C., Molina-García, A. D., Schneider Teixeira, A. 2017. Betalains and phenolic compounds of leaves and stems of *Alternanthera brasiliana* and *Alternanthera tenella*. *Food Research International*, 97, 240-249.
- [6] Kumar, S., Brooks, M. S. L. 2018. Use of red beetroot (*Beta vulgaris L.*) for antimicrobial applications-a critical review. *Food and Bioprocess Technology*, 11(1), 17-42.
- [7] Ju, H. Y., Law, C. L., Fang, X. M., Xiao, H. W., Lue, Y. H., Gao, Z. J. 2016. Drying kinetics and evolution of the sample's corn temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata*.) during convective hot-air drying. *Drying Technology*, 34(11), 1297-1306.
- [8] Onwude, D. I., Hashim, N., & Chen, G. 2016. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 132-145.
- [9] Wang, J., Law, C. L., Nema, P. K., Zhao, J. H., Liu, Z. L., Deng, L. Z., Gao, Z. J., Xiao, H. W. 2018. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon Slices.

## ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر ضخامت فوم (۵، ۶ و ۷ میلی‌متر) روی پارامترهای خشک‌کردن فومت پالپ چغندرقرمز در دمای ۵۰ درجه سلسیوس با غلظت اوآلبومین ۲٪ مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز آماری داده‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت فوم، نرخ خشک‌کردن، دانسیته توده‌ای، دانسیته ضربه‌ای، جریان‌پذیری و میزان قرمزی پودرها کاهش و در مقابل ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش یافت. افزایش ضخامت تأثیر معنی‌داری روی شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب آب نداشت. همچنین، با افزایش ضخامت فوم، ترک‌خوردگی و زبری سطحی ذرات پودر افزایش یافت. این مطالعه نشان داد که پودر چغندرقرمز تولیدشده به روش فومت می‌تواند با بهبود و بهینه‌سازی عوامل موثر بر خشک‌کردن به عنوان یک رنگ دهنده طبیعی مواد غذایی جایگزینی مناسب برای رنگ دهنده‌های مصنوعی باشد.

## ۵- منابع

- [1] Nistor, O.V., Serement, L., Andronoiu, D. G., Rudi, L., Botez, E. 2017. Influence of different drying methods on the physicochemical properties of red beetroot (*Beta vulgaris L. var. Cylindra*). *Food Chemistry*, 236, 59-67.
- [2] Chhikara, N. Kushwaha, K. Sharma, P. Gat, Y. Panghal, A. 2019. Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. *Food chemistry*, 272, 192-200.

- dried date powder. *Journal of Food Engineering*, 215, 33-43.
- [21] Aziz, M. G., Yusof, Y. A., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., Scheiling, G. 2018. Material Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*, 10(2), 66-80.
- [22] Salahi, M. R., Mohebbi, M., 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(6), 1798-1808.
- [23] Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. N., Masson, M. L. 2016. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 503-513.
- [24] Shaari, N. A., Sulaiman, R., Rahman, R. A., 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(2), 1-10.
- [25] Tontul, I., Topuz, A. 2017. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 63, 91-102.
- [26] Selig, M. J., Celli, G. C., Tan, C., La, E., Mills, E., Webley, D.A., Olga I. Padilla-Zakour, Abbaspourrad, A. 2018. High pressure processing of beet extract complexed with anionic polysaccharides enhances red color thermal stability at low pH. *Food Hydrocolloids*, 80, 292-297.
- [27] Bhandari, B. 2013. Introduction to Food Powders. *Hand book of food powders*, 1-25.
- [28] Kowalski, S.J. and Lechtańska, J.M. 2015. Drying of red beetroot after osmotic pretreatment: Kinetics and quality considerations. *Chemical and Process Engineering*, 36(3), 345-354.
- [29] Szadzińska, J., Mierzwa, D., Pawłowski, A., Musielak, G., Pashminehazar, R. and Kharaghani, A. 2020. Ultrasound-and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technology*, 38(1-2), 93-107.
- [30] Figiel, A. 2010. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 98(4), 461-470.
- [31] Singh, B. and Hathan, B.S. 2017. Process optimization of spray drying of beetroot Juice. *Journal of food science and technology*, 54(8), 2241-2250.
- Journal of Food Engineering*, 224, 129-138.
- [10] Yang, X. H., Deng, L. Z., Mujumdar, A.S., Xiao, H. W., Zhang, Q., Kan, Z. 2018. Evolution and modeling of color changes of red pepper (*Capsicum annuum L.*) during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 231, 101-108.
- [11] Zhao, D., An, K., Ding, S., Liu, L., Xu, Z., Wang, Z. 2014. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying physical quality. *Food and Bioprocess Technology*, 7(8), 2308-2318.
- [12] Asokapandian, S., Venkatachalam, S., Swamy, G. J. & Kuppusamy, K. 2016. Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. *Journal of Food Process Engineering*, 39(6), 692-701.
- [13] Ng, M. L., Sulaiman, R. 2018. Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *LWT-Food Science and Technology*, 88, 80-86.
- [14] Abbasi, E., Azizpour, M. 2016. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 105-110.
- [15] Salahi, M. R., Mohebbi, M. & Taghizadeh, M. 2017. Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) pulp powder using foam mat drying method: Effects of drying conditions on microstructural of mat and physico-chemical properties of powder. *Drying Technology*, 35 (15), 1-12.
- [16] Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. N., & Masson, M. L. 2017. Effect of process parameters on foam mat drying kinetics of yacon (*Smallanthus Sonchifolius*) and thin-layer drying modelling of experimental data. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), 1-10.
- [17] Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., Ghaffari, H. 2018. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. *Powder Technology*, 328, 470-484.
- [18] Paciulli, M., Medina-Meza, I.G., Chiavaro, E., Barbosa-Cánovas, G.V. 2016. Impact of thermal and high pressure processing on quality parameters of beetroot (*Beta vulgaris L.*), *LWT-Food Science and Technology*, 68, 98-104.
- [19] Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*; Clarendon Press: Oxford.
- [20] Seerangurayar, T., Manickavasagan, A., Al-Ismaïli, A. M., Al-Mulla, Y. A. 2017. Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze

## Study of the foam thickness effect on the effective moisture diffusion coefficient and drying kinetics of red beetroot by foam-mat method and evaluation the qualitative and functional characteristics of product

Bahriye, G.<sup>1</sup>, Dadashi, S.<sup>2\*</sup>, Dehghannya, J.<sup>3</sup>, Ghaffari, H.<sup>4</sup>

1. M.Sc. Graduated student, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran
3. Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran
4. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

(Received: 2019/10/19 Accepted:2020/01/26)

Red beetroot as a rich source of bioactive and health enhancing compounds has a high potential for use in a wide range of foods and its powder with containing these compounds, can be used as a natural antioxidant and colorant in the food industry. In the present study, red beetroot pulp powder was produced by foam-mat drying technique. Drying kinetics, physicochemical and microstructural properties of the resulting powder were investigated. To prepare foam, 2% ovalbumin (w/v) was added to the red beetroot pulp and stirred for a specific time and speed. Prepared foam was spread on aluminum plates at thicknesses of 5, 6 and 7 mm and then dried in a hot air cabinet dryer at 50 °C and constant air velocity of 1 m/s. Results showed that increasing foam thickness from 5 to 7 mm had no significant effect on moisture content and moisture ratio but significantly ( $p < 0.05$ ) reduced the drying rate by about 29.63%. The effective moisture diffusion coefficient was significantly affected by the foam thickness and ranged between  $5.550 \times 10^{-9}$  and  $7.388 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Also, with increasing foam thickness, due to increasing drying time and more denaturation of proteins, an increase in Carr index and Hausner ratio was observed, resulting in a decreasing trend in the flowability of the powders. Bulk and tapped densities of powders were significantly decreased due to the change in moisture content, caused by the increase in foam thickness. Thickness had no significant effect on water solubility index and water absorption index. The microstructure analysis of the produced powders by field emission scanning electron microscope showed that with increasing foam thickness, cracking and surface roughness of powder particles increased. The results of this study and further studies can lead to optimization of red beetroot powder production as a natural food coloring and better preservation of its nutritional and functional properties.

**Key words:** Foam-mat drying, Red beetroot powder, Drying kinetics, Effective moisture diffusion coefficient, Functional properties

---

\*Corresponding Author E-Mail Address: Dadashis@tabrizu.ac.ir