

تأثیر پارامترهای عملیاتی خشک‌کن بستر فورانی بر خصوصیات فیزیکی پودر شیر

شهربانو حامدی^۱، حمیدرضا اخوان^۲، محمد هادی نعمت‌اللهی^۳، محمد مهدی افصحی^{۴*}

۱- دانشجوی دکتری بخش مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار بخش علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- استادیار گروه بیوشیمی بالینی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

۴- دانشیار بخش مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۸)

چکیده

در این تحقیق اثر دمای هوای ورودی و نیز اثر دبی شیر ورودی بر خصوصیات فیزیکی پودر به‌دست آمده از خشک‌کن بستر فورانی بررسی شد. نمونه‌های شیر در سه سطح دمای هوای ورودی (۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس) و سه سطح دبی شیر ورودی (۱/۳۳۳، ۲/۵۰۰ و ۳/۵۵۶ میلی‌لیتر بر دقیقه) در سامانه بستر فورانی خشک شدند. اثر این عوامل بر خصوصیات فیزیکی (چگالی توده، چگالی ضربه، جریان‌پذیری، رنگ و میزان رطوبت) آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از روش سطح پاسخ میزان تأثیرگذاری عامل‌های ذکر شده بر خصوصیات فیزیکی پودر شیر مشخص و مدل‌سازی شد. مقادیر بهینه دمای هوای ورودی و دبی خوراک ورودی به ترتیب معادل ۹۳/۸۲ درجه سلسیوس و ۱/۳۳۳ میلی‌لیتر/دقیقه به‌دست آمد. در شرایط بهینه، مقادیر مطلوب هر یک از خصوصیات فیزیکی پیش‌بینی گردید و با داده‌های تجربی به‌دست آمده در شرایط بهینه ارزیابی شد.

کلید واژگان: فرآیند خشک کردن، بستر فورانی، پودر شیر، خصوصیات فیزیکی

* مسئول مکاتبات: afsahi@uk.ac.ir

۱- مقدمه

پودر شیر، محصولی مطلوب با ماندگاری بالا می‌باشد که سبب کاهش هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری می‌گردد [۱]. به علاوه، با تبدیل شیر به شیرخشک، از رشد میکروارگانیسم‌ها و واکنش‌های آنزیمی جلوگیری می‌شود که این موضوع در حفظ ویژگی‌های کیفی آن نقش قابل توجهی دارد [۲]. به طور کلی برای تولید شیر خشک از خشک‌کن غلتکی [۳]، خشک‌کن پاششی [۴] و خشک‌کن بستر فورانی^۱ [۵] استفاده می‌شود. مزیت استفاده از خشک‌کن بستر فورانی نسبت به خشک‌کن پاششی این است که این خشک‌کن دارای بازدهی گرمایی قوی‌تری است و همچنین نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه پایین‌تری دارد [۶].

آلتیاری و همکاران (۲۰۰۸) به این نتیجه رسیدند که پارامترهای عملیاتی مناسب در خشک‌کن‌ها می‌تواند بر ارزش تغذیه‌ای، ویژگی‌های حسی و عملکردی شیر تاثیر مطلوبی داشته باشند. به عبارتی، دمای بالای فرایند اثراتی بر خصوصیات عملکردی پودر شیر از قبیل اندازه ذره، چگالی و حلالیت دارد [۷]. در این راستا، در پژوهش امیری-ریگی (۲۰۱۲) و همکاران، شرایط بهینه پارامترهای عملیاتی دستگاه خشک‌کن پاششی (دمای هوای ورودی، دبی شیر ورودی و دبی هوای ورودی) بر حلالیت، بازدهی، فعالیت آبی و محتوای رطوبت پودر با روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت [۸]. در خشک کردن شیر شتر با خشک‌کن پاششی، اثر دمای هوا و دبی خوراک ورودی بر ویژگی‌های فیزیکی (خصوصیات توده^۲، قابلیت خیس شدن^۳، قابلیت پراکنده شدن^۴، شکل و اندازه ذره)، بصری^۵ و گرمایی (انتقال شیشه‌ای) پودر شیر خشک بررسی گردید. نتایج بیانگر تاثیر قابل توجه دمای هوای ورودی بر محتوای رطوبت پودرها و خصوصیات رنگ آنها بود. همچنین خصوصیات توده، قابلیت خیس شدن و پراکنده شدن پودر به صورت معنی‌داری تحت تاثیر دبی خوراک ورودی قرار گرفت [۹]. در پژوهش هبتگبریل و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شد که دما و دبی هوای ورودی و درصد ماده جامد شیر شتر بر بازدهی دستگاه خشک‌کن پاششی و دمای هوای خروجی آن تاثیرگذار است. نتایج نشان داد که دمای بالایی عملیاتی بر حلالیت پودر شیر شتر موثر بوده و پودر شیر

شتر در شرایط عملیاتی مشابه دارای چگالی توده بیشتری نسبت به پودر شیر گاو است [۱۰]. جریان‌پذیری^۶ و ویژگی‌های حلالیت، قابلیت خیس شدن و پراکنده شدن پودر شیر خشک نیز تحت تاثیر دمای هوای ورودی و درصد ماده جامد شیر بر قرار گرفت و بیان شد که جریان‌پذیری ممکن است مرتبط با محتوای رطوبت، اندازه ذره و چربی آزاد پودر شیر باشد [۱۱]. در تحقیقی دیگر که توسط نیجدم و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد، اثر دمای خشک کردن در خشک‌کن پاششی روی تغییرات مورفولوژی ذرات و قطرات مورد بررسی قرار گرفت. خوراک ورودی به خشک‌کن از حل کردن پودر شیر خشک کامل و پودر شیر بدون چربی در آب مقطر به دست آمد. آزمون‌های رنگ سنجی، خصوصیات فیزیکی پودر مثل توزیع اندازه ذره و چگالی توده و همچنین مورفولوژی پودرهای شیر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی بررسی گردید. یکی از نتایج مهم این محققین این بود که دمای انتقال شیشه‌ای پودر شیر خشک بدون چربی تحت تاثیر عملیات خشک کردن مرحله دوم قرار نگیرد [۱۲]. بنابراین به جای استفاده از روش تبخیر برای تغلیظ شیر، می‌توان محلول‌های غلیظ شیر را از پودرهای شیر تهیه کرد بدون اینکه بر مشخصات ترمودینامیکی آن تاثیر بگذارد.

پژوهش‌های کمتری در ارتباط با خشک کردن شیر با استفاده از خشک‌کن بستر فورانی گزارش شده است [۵، ۶، ۱۳، ۱۴]. در بیشتر این پژوهش‌ها، پارامترهای عملیاتی دستگاه بررسی نشده است. سازوکار خشک کردن در این خشک‌کن به این صورت است که خوراک در داخل بستری با گرانول‌های خنثی در حال فوران وارد می‌شود. خوراک ورودی فیلم نازک بر روی گرانول‌های خنثی تشکیل داده و در اثر انتقال گرمای همرفتی و هدایتی خشک می‌شود. انتقال گرمای هدایتی به وسیله گرمای ذخیره شده در گرانول‌های خنثی و انتقال گرمای همرفتی از طریق هوای گرم تامین می‌شود. در نهایت لایه نازک خشک شده روی سطح گرانول‌ها در اثر اصطکاک بین گرانول‌ها از سطح آنها جدا گردیده و به همراه هوا در سیکلون جمع‌آوری می‌شود [۱۵].

برای تولید پودر شیر با ویژگی‌های مطلوب (از قبیل حلالیت، جریان‌پذیری، رنگ و محتوای رطوبت مناسب) در خشک‌کن بستر فورانی، پارامترهای دمای هوای ورودی، دبی خوراک و دبی هوای ورودی اهمیت دارد [۱]. بنابراین در پژوهش حاضر،

1. Spouted bed dryer
2. Bulk properties
3. Wettability
4. Dispersibility
5. Optical

6. Flowability

شیر محلول حاوی ۲۰ درصد ماده جامد با حل کردن پودر شیر بدون چربی در آب مقطر تهیه شد. در خشک‌کن بستر فورانی از ۳۵۰ گرم گرانول های پلی اتیلنی با قطر 0.078 ± 0.011 میلی‌متر، 0.006 ± 0.009 کیلوگرم بر مترمکعب، کرویت 0.005 ± 0.009 استفاده شد.

ابتدا گرمکن الکتریکی و دمنده هوا روشن و سپس دبی و دمای هوای ورودی در مقادیر موردنظر تنظیم شد. مقدار دبی هوای ورودی حدود $1/4$ برابر حداقل سرعت فورانی بستر در نظر گرفته شد. دماهای خروجی هوا به وسیله سنسور نصب شده اندازه‌گیری و ثبت شد. بعد از ثابت شدن دمای هوای ورودی، برای پایا شدن دمای هوای خروجی، مقدار مشخصی آب مقطر با همان دبی در نظر گرفته شده برای خوراک ورودی وارد خشک‌کن شد. هنگامی که دمای خروجی پایا شد، خوراک با دبی مشخص به وسیله پمپ پرستالتیک و به‌صورت قطره قطره به داخل سامانه بستر فورانی وارد گردید تا فرآیند خشک کردن بر اساس انتقال گرمای هدایتی و همرفتی انجام شود. در انتهای هر آزمایش، پودر جمع‌آوری شده در سیکلون برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- تعیین میزان بهره‌وری خشک‌کن

میزان بهره‌وری خشک‌کن به عنوان نسبت میزان پودر جمع‌آوری شده از سیکلون بر میزان پودر ورودی به بستر خشک‌کن تعریف و محاسبه گردید [۱۶].

۲-۴- تعیین محتوای رطوبت

محتوای رطوبت پودر با روش متداول آون‌گذاری انجام شد. برای این منظور، مقدار مشخصی از نمونه‌های پودر در دمای ۸۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت در دو توزین متوالی قرار داده شد [۱۷]. درصد محتوای رطوبت بر مبنای اختلاف وزن پودر قبل و بعد از قرار دادن در آون محاسبه گردید.

۲-۵- تعیین چگالی توده و ضربه

مقدار مشخصی از پودر شیر به آرامی در یک استوانه مدرج ۵ میلی‌لیتری ریخته شد. حجم متناسب با این میزان پودر، برای تعیین چگالی توده، مطابق رابطه نسبت جرم به حجم، در نظر گرفته شد [۱۸].

برای اندازه‌گیری چگالی ضربه، ضربات متوالی (حدود ۱۰۰ ضربه) به استوانه مدرج حاوی مقدار مشخصی از پودر شیر

تاثیر پارامترهای دمای هوای ورودی و دبی خوراک ورودی بر خصوصیات فیزیکی پودر شیر (چگالی توده، چگالی ضربه، جریان‌پذیری، رنگ و محتوای رطوبت) تولید شده در خشک‌کن بستر فورانی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

پودر شیر بدون چربی از شرکت شیر پاستوریزه پگاه کرمان خریداری شد.

۲-۲- فرآیند خشک کردن در بستر فورانی

خشک‌کن بستر فورانی شامل یک پایه مخروطی با زاویه داخلی ۶۰ درجه و قطر ورودی ۱۵ میلی‌متر است که یک ستون استوانه‌ای از جنس پلکسی گلاس با قطر داخلی ۹۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر به پایه مخروطی خشک‌کن وصل می‌شود. گرمکن الکتریکی (متشکل از دو المنت هر کدام با توان چهار کیلو وات)، دمنده هوا با توان ۲/۲ کیلووات (GREENCO مدل 2RB) مجهز به اینورتر سه فاز، پمپ پرستالتیک، روتامتر و سیکلون اجزاء اصلی خشک‌کن بستر فورانی را تشکیل دادند (شکل ۱).

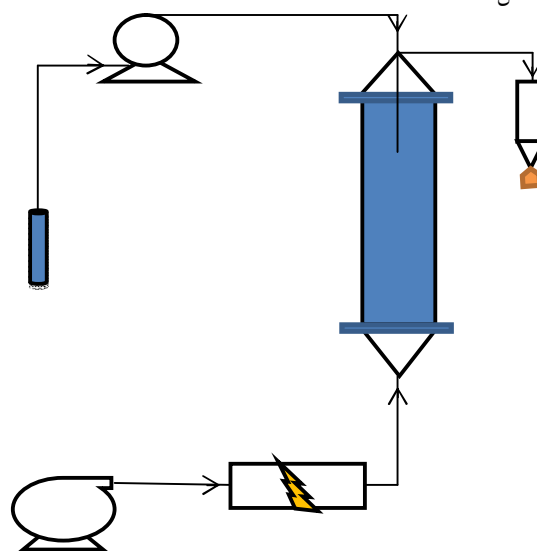


Fig 1 Schematic diagram of the spouted bed dryer: 1- Concentrated milk, 2- Peristaltic pump, 3- Spouted bed dryer, 4- Cyclone, 5- Milk powder, 6- Heater, 7- Blower

1. Bulk density
2. Tapped density

گردید. شاخص‌های L^* جهت سنجش تقریبی روشنایی (۰ و ۱۰۰ به ترتیب نشان دهنده سیاه و سفید)، a^* نشان دهنده میزان قرمزی (۱۰۰- و ۱۰۰+ به ترتیب نشان دهنده رنگ سبز و قرمز) و b^* نشان دهنده میزان زردی (۱۰۰- و ۱۰۰+ به ترتیب نشان دهنده آبی و زرد) اندازه‌گیری شدند تا بتوان بر اساس این عوامل، اختلاف رنگ کلی ΔE را با استفاده از معادله ۳ برآورد کرد. این پارامتر بیانگر میزان اختلاف رنگ نمونه‌های پودر بعد و قبل از خشک شدن است. اختلاف رنگ کلی را از لحاظ قابل تشخیص دادن می‌توان به سه دسته تفاوت زیاد ($\Delta E > 3$)، تفاوت متوسط ($1/5 < \Delta E < 3$) و تفاوت کم ($\Delta E < 1/5$) تقسیم‌بندی کرد [۲۱].

(۳)

$$\Delta E = \sqrt{(a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2 + (L^* - L_0^*)^2}$$

در معادله بالا، L^* ، a^* ، b^* ، مقادیر مربوط به نمونه‌های پودر خشک شده به روش بستر فورانی و L_0^* ، a_0^* ، b_0^* مقادیر مربوط به نمونه مرجع (پودر شیر خریداری شده از شرکت پگاه کرمان) هستند.

۲-۸- آنالیز آماری

بررسی اثر پارامترهای دمای هوای ورودی و دبی خوراک ورودی به کمک نرم افزار مینی‌تب نسخه ۱۷ انجام شد. در این نرم افزار، اثر دمای هوای ورودی در سه سطح ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس و دبی خوراک ورودی در سه سطح ۱/۳۳۳، ۲/۵۰۰ و ۳/۵۵۶ میلی‌لیتر بر دقیقه با استفاده از طرح فاکتوریل کامل در نظر گرفته شد (جدول ۳). با بررسی‌های اولیه، سه سطح دمایی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس بر مبنای بازدهی نسبتاً کم سامانه در دمای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس و تغییر شکل گرانول‌های پلی‌اتیلن در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس انتخاب گردید. همچنین بر مبنای دماهای انتخابی و بررسی پایداری فواره گرانول‌های پلی‌اتیلنی در شدت‌های مختلف خوراک، سه سطح موردنظر دبی خوراک ورودی نیز تعیین شد.

خشک زده شد تا زمانی که تغییری در حجم آن ایجاد نشود. نسبت وزن پودر به حجم به دست آمده به عنوان چگالی ضربه در نظر گرفته شد [۱۹، ۲۰].

۲-۶- جریان‌پذیری و چسبندگی

جریان‌پذیری و چسبندگی^۱ پودرها به ترتیب با استفاده از اندیس کار^۲ و نسبت هاسنر^۳ ارزیابی و بر مبنای معادله‌های ۱ و ۲ محاسبه گردید. بر اساس مقادیر اندیس کار و نسبت هاسنر، طبقه‌بندی جریان‌پذیری و چسبندگی پودر به صورت جدول‌های زیر می‌باشد [۱۸].

$$CI = \frac{\rho_{tapped} - \rho_{bulk}}{\rho_{tapped}} \times 100$$

$$HR = \frac{\rho_{tapped}}{\rho_{bulk}}$$

CI: اندیس کار، HR: نسبت هاسنر، ρ_{tapped} : چگالی ضربه، ρ_{bulk} : چگالی توده

Table 1 Classification of powder flowability based on Carr index

Carr index	Flowability
<15	Very good
15-20	Good
20-35	Fair
35-45	Bad
>45	Very bad

Table 2 Classification of powder cohesiveness based on Hausner ratio

Hausner ratio	Cohesiveness
<1.2	Low
1.2-1.4	Intermediate
>1.4	High

۲-۷- اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ

شاخص‌های رنگ (L^* ، a^* و b^*) نمونه‌های خشک شده با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج TES 135A (تایوان) ارزیابی

4. Total color difference

1. Cohesiveness
2. Carr's index
3. Hausner ratio

Table 3 The experiments carried out by the spouted bed dryer

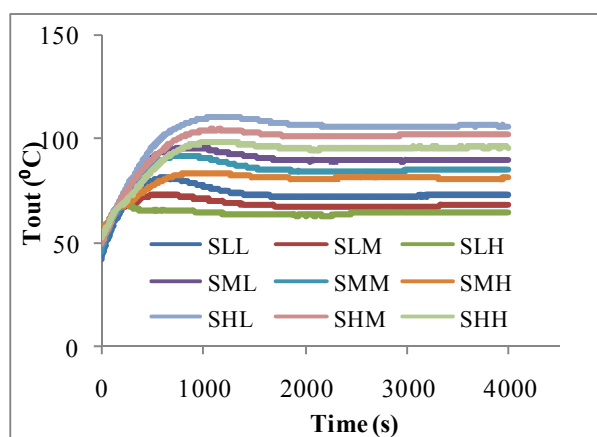
Sample	Milk flow rate (ml/min)	Inlet air temperature (°C)
SHH	3.556	120
SHM	2.500	120
SHL	1.334	120
SMH	3.556	100
SMM	2.500	100
SML	1.334	100
SLH	3.556	80
SLM	2.500	80
SLL	1.334	80

* S: Sample, H: High, M: Medium, L: Low

The first index represents the sample, the second indicates the temperature, and the third one represents the milk flow rate. Example: SHM, a sample that is dried at high temperature and medium milk flow rate

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ دماهای اندازه‌گیری شده هوا هنگام خروج از بستر در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص شد که نمونه‌های مختلف در زمان‌های متفاوتی به شرایط پایا می‌رسند. اما با اطمینان می‌توان بیان کرد که پس از گذشت مدت زمان ۱۵۰۰ ثانیه از فرایند خشک کردن، تمام نمونه‌ها به شرایط پایا رسیده و می‌توان نمونه شیر را برای خشک کردن وارد بستر نمود.

**Fig 2** The outlet air temperature at different conditions of the drying process

۳-۱- اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک بر

میزان بهره‌وری خشک‌کن (R)

با توجه به شکل ۲، افزایش دمای هوای ورودی میزان بازدهی را افزایش داد. افزایش دما می‌تواند سبب افزایش سرعت انتقال حرارت از هوا و گرانول‌ها به قطرات شیر گردد. در نتیجه این

آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت. سپس اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک بر پارامترهایی از قبیل محتوای رطوبت، چگالی و تغییر رنگ پودر به منظور تعیین شرایط بهینه با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل توانایی RSM در تعیین برهم‌کنش بین دمای هوای ورودی و دبی خوراک ورودی و عبارت درجه دوم این فاکتورها، این روش انتخاب شد [۲۲]. برای به دست آوردن ضرایب رگرسیون، داده‌های آزمایشگاهی با معادله چند جمله‌ای درجه دوم به فرم معادله ۳ تطبیق داده شد.

(۳)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j$$

در این معادله، β_0 ، β_i ، β_{ii} ، β_{ij} به ترتیب ضرایب رگرسیون برای عبارت‌های ثابت، خطی، درجه دوم و برهم‌کنش، Y پاسخ پیش‌بینی شده، X_i و X_j متغیرهای مستقل و k تعداد متغیرهای مورد آزمایش تعریف شده‌اند [۲۳]. با استفاده از بررسی ضریب تعیین پیش‌بینی شده (R^2_{predict}) و آزمون عدم برازش ((P value) lack of fit) می‌توان مناسب بودن مدل را بررسی کرد. در صورتی که آزمون عدم برازش معنی‌دار نباشد، مدل مناسب می‌باشد و برازش داده‌ها با مدل درجه دوم بخوبی صورت گرفته است.

1. Constant
2. Linear
3. Quadratic
4. Interaction

دمای هوای ورودی و کاهش دبی خوراک، موجب کاهش محتوای رطوبت پودر شد. این نتیجه قابل انتظار است به دلیل اینکه محتوای رطوبت وابستگی زیادی به سازوکار خشک کردن دارد [۲۵]. این روند در تحقیق آگولا و همکاران (۲۰۱۹) در خشک کردن شیر شتر با خشک‌کن پاششی مشاهده شد [۹].

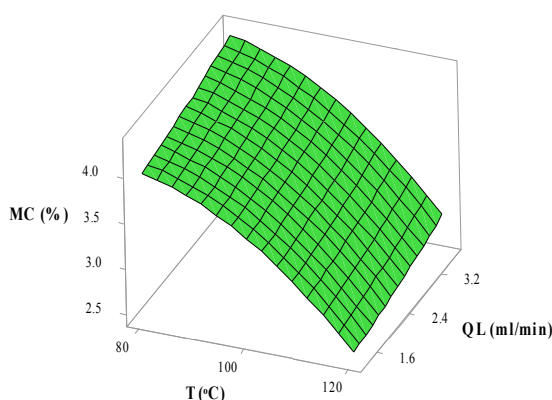


Fig 4 The effect of inlet air temperature and milk flow rate (QL) on the moisture content (MC) of the powder

۳-۳- اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک بر

چگالی توده (BD)، چگالی ضربه (TD)،

ضریب کار و ضریب هاسنر

در مطالعه حاضر، چگالی توده و چگالی ضربه نمونه‌های پودر شیر در دامنه‌های ۵۴۶-۶۲ و ۶۲۵-۸۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. شارما و همکاران (۲۰۱۲) چگالی توده پودر شیر را در دامنه ۳۰۰-۶۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و چگالی ضربه را در محدوده ۴۴۰-۸۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آوردند [۲۸].

بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش دمای هوای ورودی، چگالی نمونه‌های پودر شیر کاهش یافت. روند مشابهی در خشک کردن شیر به وسیله خشک‌کن پاششی گزارش شده است [۱۱-۹]. در واقع می‌توان گفت که ذرات پودر تولید شده در دمای بالا، به دلیل شدت تبخیر بالا، دارای ساختاری با تخلخل بیشتر هستند که همین موضوع منجر به چگالی توده پایین‌تر در این پودرها می‌گردد. پودر با چگالی توده پایین، هوای بیشتری را در خود حبس می‌کند، بنابراین چنین محصولی مستعد واکنش‌های اکسایشی بوده و در نتیجه پایداری محصول در زمان انبارداری

افزایش، سرعت خشک کردن بیشتر شده و در نتیجه بازدهی خشک‌کن افزایش می‌یابد [۱۰]. نتایج مشابهی توسط Langrish و همکاران [۲۴]، Passos و همکاران [۲۵] و Velasquez و همکاران [۲۶] مشاهده شد.

علاوه بر فاکتور دما، فاکتور دبی خوراک ورودی نیز بر میزان بهره‌وری خشک‌کن تاثیرگذار است. با توجه به شکل ۲، با افزایش این متغیر میزان بازدهی خشک‌کن کاهش یافت. افزایش دبی خوراک ورودی به خشک‌کن در یک دمای ثابت هوای ورودی، موجب کاهش دمای خروجی گردید که همین مسئله باعث کاهش بازدهی خشک‌کن شد (شکل ۳). چنین روندی در خشک کردن عصاره گیاهی با خشک‌کن بستر فورانی مشاهده شده است [۲۷].

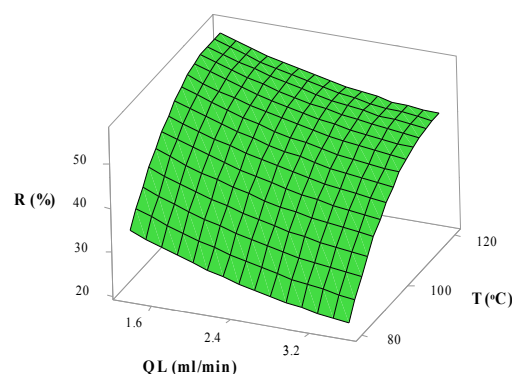


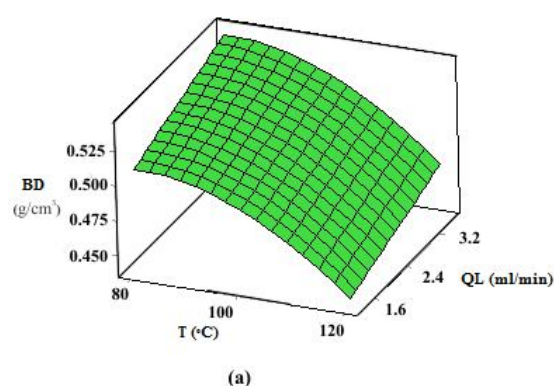
Fig 3 The effect of inlet air temperature (T) and milk flow rate (QL) on the product recovery (R)

۳-۲- اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک بر

محتوای رطوبت پودر (MC)

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI 2012)، حداکثر میزان محتوای رطوبت پودر شیر کم‌چرب را بر اساس روش خشک کردن (پاششی و غلطکی) و کیفیت (درجه یک و معمولی) در محدوده ۴/۵-۵ درصد در نظر گرفته است. در پژوهش حاضر، میزان محتوای رطوبت پودر، با توجه به دمای هوای ورودی و دبی خوراک ورودی در محدوده ۲/۴۷۷ تا ۴/۳۲۰ درصد بود. مدل پیشنهادی اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک بر میزان محتوای رطوبت در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به $R^2_{predict}$ به دست آمده، مدل از پیش‌بینی خوبی برخوردار است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است افزایش

نیز در جدول ۵ آورده شده است. در صورتی که آزمون عدم برازش معنی‌دار نباشد، مدل مناسب می‌باشد و برازش داده‌ها با مدل درجه دوم به خوبی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که $R^2_{\text{predict}} = 79/84$ و $(P \text{ value})_{\text{lack of fit}} = 0/83$ برای چگالی توده و $R^2_{\text{predict}} = 87/09$ و $(P \text{ value})_{\text{lack of fit}} = 0/978$ برای چگالی ضربه از پیش‌بینی خوبی برخوردار هستند.



کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حجم مورد نیاز برای بسته‌بندی و انبار کردن این فرآورده‌ها افزایش می‌یابد [۲۹،۹]. نتایج نشان داد که افزایش دبی خوراک ورودی منجر به افزایش چگالی پودر گردید. به عبارتی، افزایش دبی خوراک ورودی موجب کاهش دمای خروجی شد. تاثیر این دو عامل بر چگالی توده و ضربه در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل‌های پیشنهادی

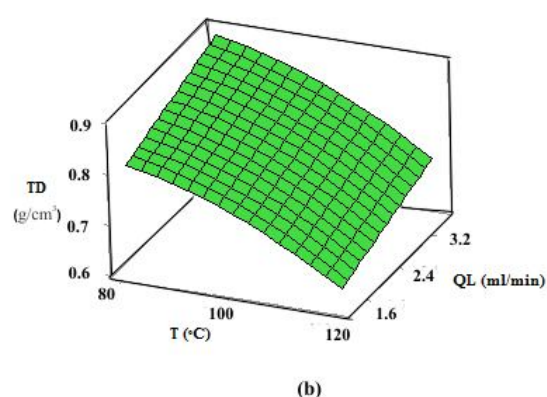


Fig 5 The effect of inlet air temperature and milk flow rate (QL) on the density of milk powder: (a) the bulk density (BD) and (b) the tapped density (TD)

بیشتر و جریان‌پذیری ضعیف‌تری هستند. این روند در تحقیقات Reddy و همکاران [۱۱] نیز مشاهده شد. علاوه بر این، محتوای رطوبت پودر نیز اثر مهمی بر جریان‌پذیری پودر دارد. افزایش محتوای رطوبت منجر به افزایش پیوندها و نیروهای موینگی^۱ بین ذرات پودر می‌گردد که این موضوع باعث کاهش جریان‌پذیری می‌شود [۳۲]. در شرایط عملیاتی با دمای هوای ورودی بالا و دبی خوراک ورودی کم، محتوای رطوبت نسبت به حالات دیگر کمتر بود که این موضوع سبب شد تا جریان‌پذیری پودر مناسب‌تر و چسبندگی کمتر باشد.

مدل‌های ارائه شده برای این دو ضریب در جدول ۵ بیان شده است. اگرچه مدل رگرسیون ضریب کار، قدرت پیش‌گویی پایینی $(R^2_{\text{predict}} = 0\% \text{ و } 71/32)$ ارائه کرد اما دارای $(P \text{ value})_{\text{lack of fit}} = 0/763$ است که نشان‌دهنده این مطلب است که برازش خوبی بین مدل و داده‌های تجربی وجود دارد. در شکل ۶ اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک روی این دو ضریب نشان داده شده است.

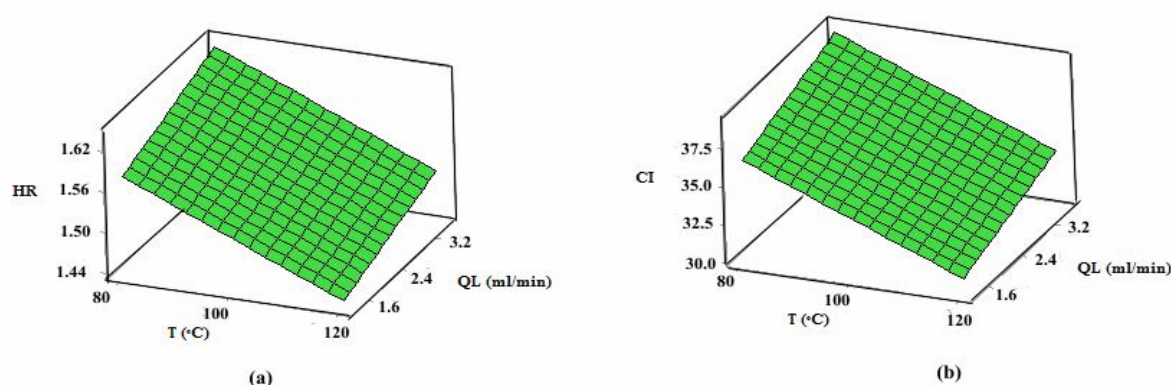
جریان‌پذیری پودر، به صورت توانایی جریان یافتن مناسب پودر تعریف می‌شود. محتوای رطوبت، میزان چربی و اندازه ذرات از جمله فاکتورهای موثر بر جریان‌پذیری پودر هستند [۳۰]. در صنایع لبنی، جریان‌پذیری یک فاکتور مهم از نظر جابجایی، پر و خالی کردن قیف، ذخیره‌سازی در سیلوها و همچنین پر کردن کیسه‌ها برای بسته‌بندی و ذخیره‌سازی است [۲۸]. با توجه به جدول ۴، جریان‌پذیری پودرها در محدوده نسبتاً خوب و ضعیف قرار داشتند. اندیس هاسنر تمام نمونه‌ها، بیشتر از ۱/۴ بود که این موضوع نشان‌دهنده این است که چسبندگی پودرها زیاد می‌باشد. با افزایش دما، جریان‌پذیری پودرها بهبود یافت و میزان چسبندگی پودرها کمتر شد (شکل ۶). در این شرایط به دلیل افزایش شدت انتقال حرارت و شدت تبخیر بالا، زمان اقامت پودر کمتر شده و ذرات برخورد کمتری با گرانول‌ها دارند. با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات Rennie و همکاران [۳۱]، پودرهای ریز به دلیل سطح تماس بالاتر، دارای چسبندگی

1 Capillary forces

Table 4 The bulk density, tapped density, Carr index and Hausner ratio at different conditions

Sample	BD (g/cm ³)	TD (g/cm ³)	CI	HR	MC
SHH	0.472±0.005	0.714±0.000	33.850±0.731	1.513±0.017	2.857±0.062
SHM	0.462±0.010	0.683±0.022	32.323±0.714	1.478±0.016	2.583±0.120
SHL	0.435±0.000	0.625±0.000	30.435±0.000	1.437±0.000	2.477±0.084
SMH	0.518±0.012	0.822±0.016	37.018±2.367	1.587±0.060	3.803±0.034
SMM	0.509±0.012	0.791±0.030	35.614±0.868	1.554±0.021	3.617±0.062
SML	0.500±0.000	0.751±0.026	33.333±2.357	1.502±0.052	3.587±0.141
SLH	0.546±0.014	0.884±0.036	38.207±0.965	1.619±0.025	4.320±0.094
SLM	0.532±0.018	0.859±0.036	38.064±0.882	1.615±0.023	4.220±0.094
SLL	0.510±0.024	0.812±0.030	37.259±0.591	1.595±0.015	3.940±0.053
SC	0.488±0.012	0.690±0.024	29.286±0.714	1.414±0.014	4.600±0.140

BD: Bulk density, TD: Tapped density, CI: Carr's index, HR: Hausner ratio, MC: Moisture content

**Fig 6** The effect of inlet air temperature and milk flow rate (QL) on the a) Hausner ratio (HR) and b) Carr's index (CI)

همراه هستند (R^2_{predict} برابر با ۰/۸۷۳، ۰/۸۶۳، ۰/۹۰۸، ۰/۸۰۵، ۰/۸۷۳، ۰/۸۶۳، ۰/۹۰۸، ۰/۸۰۵) به ترتیب برای a^* ، b^* ، L^* و ΔE ، همان‌طور که پارامتر عدم برازش هم این مساله را تایید کرد (جدول ۵).

کاهش L^* با افزایش دما و کاهش دبی خوراک ورودی می‌تواند به دلیل محتوای رطوبت پایین‌تر نمونه‌ها در این حالت باشد. علاوه بر این، پودرها مستعد واکنش‌های شیمیایی مثل واکنش‌های مایلارد^۱ در دماهای بالا هستند [۲۸]. در واقع انجام واکنش‌های مایلارد و تشکیل ملانوئین در دبی خوراک کم و دمای هوای ورودی بالا، بیشتر رخ داده و آسیب حرارتی به وجود آمده باعث افزایش ΔE می‌گردد [۹].

۳-۴- اثر دمای هوای ورودی و دبی خوراک بر

شاخص‌های رنگ

بر اساس نتایج به‌دست آمده، دمای هوای ورودی پایین‌تر و دبی خوراک ورودی بالاتر موجب افزایش L^* و کاهش a^* و b^* گردید که به واسطه تغییر این شاخص‌ها، مقدار ΔE نیز کاهش یافت (شکل ۷). در این راستا، سلیمان و همکاران (۲۰۱۴) نیز کاهش L^* و افزایش a^* و b^* را با افزایش دمای هوای ورودی خشک‌کن پاشنی گزارش کردند [۱].

مدل‌های رگرسیون مربوط به شاخص‌های رنگ با پیش‌بینی خوبی

1. Maillard reaction

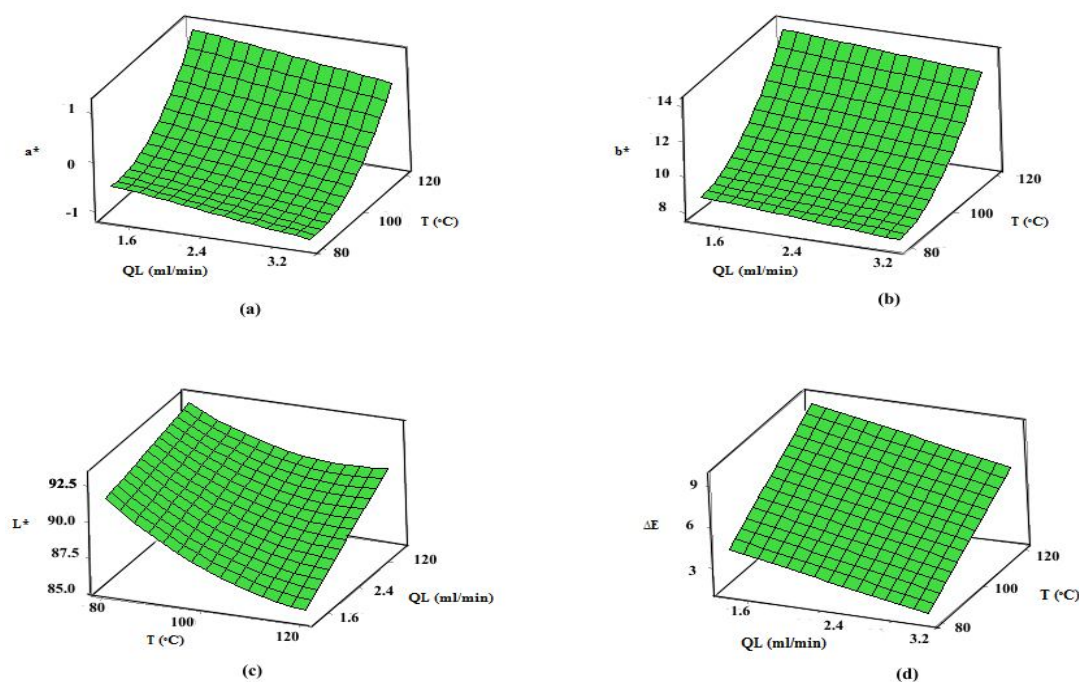


Fig 7 The effect of inlet air temperature and milk flow rate (QL) on the color characteristics (L^* , a^* , b^* and ΔE) of the milk powders

Table 5 The obtained models relevant to the physical properties of the milk powder evaluated by the experimental data

Response	Model	R^2_{predict}	P value (model)	P value (lack of fit)
MC	$= 0.38 + 0.0967 T + 0.1460 QL - 0.000674 T^*T$	0.966	0.000	0.342
BD	$= 0.258 + 0.00616 T + 0.01375 QL - 0.000040 T^*T$	0.798	0.000	0.830
TD	$= 0.517 + 0.00812 T + 0.03496 QL - 0.000063 T^*T$	0.871	0.000	0.978
HR	$= 1.8133 - 0.003417 T + 0.02896 QL$	0.851	0.000	0.863
CI	$= 46.24 - 0.1410 T + 1.211 QL$	0.713	0.000	0.786
a^*	$= 8.76 - 0.2152 T - 0.2476 QL + 0.001291 T^*T$	0.805	0.000	0.993
b^*	$= 28.37 - 0.488 T - 0.414 QL + 0.003116 T^*T$	0.908	0.000	0.366
L^*	$= 131.91 - 0.735 T - 2.11 QL + 0.002705 T^*T + 0.0357 T^*QL$	0.863	0.000	0.516
ΔE	$= -5.05 + 0.1366 T - 1.247 QL$	0.873	0.000	0.100
R	$= -179.7 + 4.175 T - 5.001 QL - 0.01794 T^*T$	0.942	0.000	0.208

MC: Moisture content, BD: Bulk density, TD: Tapped density, HR: Hausner ratio, CI: Carr's index, a^* : Redness, b^* : Yellowness, L^* : Lightness, ΔE : Total color difference, R: Product recovery, QL: Milk flow rate, T: Inlet air temperature, T^*QL : Interaction of milk flow rate and inlet air temperature.

به دست آمده برای دمای هوای ورودی و دبی خوراک بهینه به ترتیب معادل $93/82^\circ\text{C}$ و $1/333 \text{ ml/min}$ به دست آمد. با قرار دادن مقادیر به دست آمده ($93/82^\circ\text{C}$ و $1/333 \text{ ml/min}$) در روابط موجود در جدول ۶، مقادیر پیش بینی شده پاسخها حاصل شد. اعتبارسنجی مدل های به دست آمده برای چگالی، رطوبت

۳-۵- بهینه سازی

در نرم افزار مینی تب، عملیات بهینه سازی چند متغیره انجام و دمای دبی هوای ورودی بهینه برای دریافت بهترین پاسخ مربوط به متغیرهای چگالی توده (BD)، محتوای رطوبت (MC)، تغییر رنگ (ΔE) و میزان بازدهی خشک کن (R) به دست آمد. مقادیر

به‌دست آمده و میزان درصد خطا در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد خطای به‌دست آمده قابل قبول بوده و در نتیجه مدل‌های مذکور و کمیت‌های بهینه به‌دست آمده را می‌توان در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار داد.

پودر، تغییر رنگ پودر و بازدهی بستر از طریق انجام عملیات خشک کردن توسط بستر فورانی در شرایط بهینه دمای ورودی هوا و دبی خوراک صورت گرفت. نتایج حاصل از انجام این آزمایش با مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها مقایسه شد. مقادیر

Table 6 Comparison of the predicted and experimental values relevant to bulk density (BD), moisture content (MC), total color difference (ΔE) and product recovery (R) of the powder at the optimum condition.

	BD	MC	ΔE	R
The predicted values at the optimum conditions	0.503	3.713	6.148	48.023
The experimental values at the optimum conditions	0.505±0.012	3.397±0.117	5.015±0.892	44.802±1.970
% Error	0.398	8.511	18.429	6.707

Comparison of physicochemical properties of spray-dried camel's milk and cow's milk powder. International Journal of Food Science and Nutrition Engineering, 4, 15-19.

- [2] Birchall, V. S., Passos, M. L. (2005). Modeling and simulation of milk emulsion drying in spray dryers. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 22(2), 293-302.
- [3] Thomas, M. E., Scher, J., Desobry-Banon, S., Desobry, S. (2004). Milk powders ageing: effect on physical and functional properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 44(5), 297-322.
- [4] Kelly, J., Kelly, P. M., & Harrington, D. (2002). Influence of processing variables on the physicochemical properties of spray dried fat-based milk powders. Le Lait, 82(4), 401-412.
- [5] Perazzini, M. T., Freire, F. B., Ferreira, M. C., Freire, J. T. (2018). Stability and performance of a spouted bed in drying skimmed milk: Influence of the cone angle and air inlet device. Drying Technology, 36(3), 341-354.
- [6] Ochoa-Martinez, L. A., Brennan, J. G., Niranjana, K. (1993). Spouted bed dryer for liquid foods. Food Control, 4(1), 41-45.
- [7] Altieri, G., Di Renzo, G. C., & Genovese, F. (2008). Preliminary results using a new method to optimize a spray dryer process for producing high quality milk powder from cow, goat and she-ass milk concentrates. Journal of Agricultural Engineering, 39(4), 35-41.
- [8] Amiri Rigi, A., Mohammadifar, M. A., Emam-Djomeh, Z., Mohammadi, M. (2011).

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر دمای هوای ورودی و دبی شیر ورودی بر خصوصیات فیزیکی شیر خشک شده با سامانه بستر فورانی بررسی گردید. نتایج نشان داد که این دو عامل قادر هستند خصوصیات فیزیکی نمونه‌های پودر شیر را تحت تاثیر قرار دهند. میزان تاثیرگذاری این دو عامل بر ویژگی‌هایی پودر شیر خشک از قبیل چگالی توده، چگالی ضربه، جریان‌پذیری، رنگ و محتوای رطوبت به صورت روابطی تعریف شد. در نهایت مقادیر بهینه این دو فاکتور با توجه به ویژگی‌های مورد بررسی تعیین و اعتبار مدل‌ها از طریق انجام آزمایش خشک کردن شیر در شرایط بهینه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل‌های به‌دست آمده توانایی پیش‌بینی رفتار روش بستر فورانی برای خشک کردن شیر در شرایط مختلف این سامانه را دارند.

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با پشتیبانی "صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور" در قالب طرح مصوب با شماره ۹۶۰۳۶۵۹ انجام شد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از این صندوق اعلام نمایند.

۶- منابع

- [1] Sulieman, A. M. E., Elamin, O. M., Elkhalfifa, E. A., & Laleye, L. (2014).

- [18] Jinapong, N., Supphantharika, M., Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194-205.
- [19] Nijdam, J. J., Langrish, T. A. G. (2005). An investigation of milk powders produced by a laboratory-scale spray dryer. *Drying Technology*, 23(5), 1043-1056.
- [20] Westergaard, V. (1983). *Milk powder technology: evaporation and spray drying*. A/S NIRO Atomizer.
- [21] Pathare, P. B., Opara, U. L., Al-Said, F. A. J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60.
- [22] Ferreira, S. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandao, G. C., Silva, E.G.P.da, Portugal, L.A., Dos Reis, P.S., Souza, A.S., Dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179-186.
- [23] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, USA.
- [24] Langrish, T. A. G., Marquez, N., Kota, K. (2006). An investigation and quantitative assessment of particle shape in milk powders from a laboratory-scale spray dryer. *Drying Technology*, 24(12), 1619-1630.
- [25] Passos, M. L., Trindade, A. L. G., d'Angelo, J. V. H., Cardoso, M. (2004). Drying of black liquor in spouted bed of inert particles. *Drying Technology*, 22(5), 1041-1067.
- [26] Ciro-Velásquez, H. J., Cunha, R. L., Menegalli, F. C. (2010). Drying of xanthan gum using a two-dimensional spouted fluidized bed (2DSFB) with inert particles: Performance and rheological considerations. *Drying Technology*, 28(3), 389-401.
- [27] Souza, C. R. F., Oliveira, W. P. (2009). Drying of herbal extract in a draft-tube spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(2), 279-288.
- [28] Sharma, A., Jana, A. H., Chavan, R. S. (2012). Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications—a review. *Comprehensive Reviews in Food science and Food safety*, 11(5), 518-528.
- Response surface optimisation of spray dryer operational parameters for low-phenylalanine skim milk powder. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(9), 1830-1839.
- [9] Ogolla, J. A., Kulig, B., Bădulescu, L., Okoth, M. W., Esper, G., Breitenbach, J., Hensel, O., Sturm, B. (2019). Influence of Inlet Drying Air Temperature and Milk Flow Rate on the Physical, Optical and Thermal Properties of Spray-Dried Camel Milk Powders. *Food and Bioprocess Technology*, 12(5), 751-768.
- [10] Habtegebriel, H., Edward, D., Wawire, M., Sila, D., Seifu, E. (2018). Effect of operating parameters on the surface and physico-chemical properties of spray-dried camel milk powders. *Food and Bioprocess Technology*, 112, 137-149.
- [11] Reddy, R. S., Ramachandra, C. T., Hiregoudar, S., Nidoni, U., Ram, J., Kammar, M. (2014). Influence of processing conditions on functional and reconstitution properties of milk powder made from Osmanabadi goat milk by spray drying. *Small Ruminant Research*, 119(1-3), 130-137.
- [12] Nijdam, J. J., & Langrish, T. A. G. (2005). An investigation of milk powders produced by a laboratory-scale spray dryer. *Drying Technology*, 23(5), 1043-1056.
- [13] de Souza Nascimento, B., Freire, F. B., Freire, J. T. (2013). Neuronal and grey modelling of milk drying in spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11), 1815-1821.
- [14] Perazzini, M. T. B., Freire, F. B., Freire, J. T. (2015). Influence of bed geometry on the drying of skimmed milk in a spouted bed. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 5(04), 447.
- [15] Kudra, T., Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced drying technologies*. CRC press. New York, USA.
- [16] Braga, M. B., Rocha, S. C. (2013). Drying of milk-blackberry pulp mixture in spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11), 1786-1792.
- [17] Yazdanpanah, N., Langrish, T. A. (2011). Crystallization and drying of milk powder in a multiple-stage fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 29(9), 1046-1057.

- [31] Rennie, P. R., Chen, X. D., Hargreaves, C., Mackereth, A. R. (1999). A study of the cohesion of dairy powders. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 277-284.
- [32] Fitzpatrick, J. J., Iqbal, T., Delaney, C., Twomey, T., Keogh, M. K. (2004). Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. *Journal of food Engineering*, 64(4), 435-444.
- [29] Goula, A. M., Adamopoulos, K. G. (2008). Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. Powder properties. *Drying Technology*, 26(6), 726-737.
- [30] Ganesan, V., Rosentrater, K. A., Muthukumarappan, K. (2008). Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders—a review with implications for DDGS. *Biosystems Engineering*, 101(4), 425-435.

Effect of operational parameters of spouted bed dryer on the physical properties of milk powder

Hamed, Sh.¹, Akhavan, H. R.², Nematollahi, M. H.³, Afsahi, M. M.^{4*}

1. PhD student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. Assistant Professor, Department of Clinical Biochemistry, Faculty of Medicine, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
4. Associate professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received: 2019/10/12 Accepted: 2019/12/29)

In this study, the effect of the inlet air temperature and milk flow rate on the physical properties of the milk powder obtained from the spouted bed dryer was investigated. Milk samples were dried at three levels of inlet air temperature (80, 100 and 120 °C) and three levels of milk flow rate (1.333, 2.500, 3.556 ml/min). The effect of these factors on the physical properties (bulk density, tapped density, flowability, color, and moisture content) of the powders was evaluated. The effects of the mentioned factors on the physical properties of milk powder were determined and modeled using response surface methodology. The optimum inlet air temperature and the milk flow rate was obtained 93.82 °C and 1.333 ml/min, respectively. Under these conditions, the desired values for each physical parameter were predicted and compared with the experimental data.

Keywords: Drying, Spouted bed, Milk powder, Physical properties.

* Corresponding Author E-mail address: afsahi@uk.ac.ir