



Research Article

CFD simulation of milk performance parameters effect on the physical indices of a spray dryer

Hasan Ghafori^{1*}, Hamid Karimian²

 Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
 Master's degree, Department of Mechanical Engineering, Maj.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran. (Received: 8 Februar 2025, Revised:18 March 2025, Accepted:30 March 2025)

Abstract

Introduction:Drying is performed for various purposes, including preventing spoilage, reducing volume, facilitating packaging and storage, and enabling easier transportation. There are several drying methods, both natural and artificial. One widely used artificial method is spray drying. Spray dryers are commonly employed in the production of materials such as milk powder, dairy powders, coffee powder, and fruit powders. Spray drying has also been reported as an effective method for producing potato starch for various applications in both food and non-food industries. This method involves removing moisture from a solution using heated air. The spray drying process consists of several key steps: atomizing the solution, transforming the droplets into dry particles, and collecting the particles within the drying chamber. For each product type, the drying parameters must be carefully optimized to achieve the desired characteristics of the resulting powder. To determine the optimal drying parameters for each product, specific research has been conducted using both experimental and simulation methods. Studies have shown that the input parameters—such as the properties of the injected solution and the characteristics of the hot air introduced into the spray dryer—have a direct impact on drying quality. These parameters must be optimized based on the desired properties of the final dried powder. On the other hand, due to the high cost associated with experimental tests for optimizing the effect of input parameters on the drying process within the chamber, many studies have employed simulation approaches using software and CFD methods.

Materials and methods: The effect of mass flow parameters of solution in six levels $10^{*1}0^{-3}$, $15^{*1}0^{-3}$, $20^{*1}0^{-3}$, $25^{*1}0^{-3}$, $30^{*1}0^{-3}$ and $35^{*1}0^{-3}$ kg/s and the size of the particles sprayed in three levels 50, 100 and 150 µm on the distribution of pressure, velocity and temperature of the particles inside the drying chamber were investigated. Given that both liquid and gas phases enter the dryer, the simulation was conducted as a two-phase (liquid-gas) flow using the Euler-Euler approach. In this model, the milk was treated as a fluid with constant thermophysical properties, injected into the chamber and dispersed in the air as a separate phase. ANSYS Fluent 18 software was used in this study to perform the CFD simulations. The optimal conditions for milk drying were determined by analyzing various contours and graphs related to pressure, velocity, and temperature. The geometry of the problem was drawn in 3D. The spray dryer was modeled with a cylindrical chamber having a diameter of 60 cm and a height of 90 cm, including a conical section with a height of 40 cm. The wall of the drying chamber was assumed to be thermally insulated, with zero heat flux. Boundary conditions included a velocity inlet at the top of the dryer and a pressure outlet at the bottom, with the gauge pressure set to zero. A no-slip condition was applied to all chamber walls. For better convergence, the second-order upstream method was used in the momentum and energy equation. The convergence criteria for the simulation were set to 10^{-6} for the momentum, axial velocity, and radial velocity equations, and 10^{-9} for the energy equation.

Results and discussion: The pressure distribution along the vertical axis of the dryer chamber indicated that increasing the mass flow rate of the inlet air from 0.01 kg/s to 0.035 kg/s led to a rise in internal pressure. Conversely, increasing the diameter of milk particles from 50 μ m to 150 μ m resulted in a decrease in chamber pressure. Additionally, increasing the mass flow rate of milk from 0.01 kg/s to 0.035 kg/s caused an increase in particle velocity. Given that the dimensions of the inlet opening for the solution were assumed to remain constant during the simulation, the relationship Q=A×V indicates that an increase in the inlet flow rate resulted in an

^{*} Corresponding author: h.ghafori569@iau.ac.ir

increase in particle velocity. The maximum observed increase in particle speed was 15.5%. Increasing the diameter of the particles from 50 μ m to 150 μ m resulted in an increase in particle velocity. As the particle diameter increased, the weight force of the particles also increased, creating a stronger flux of movement. This enhanced movement flux led to a rise in particle velocity, with a maximum increase of 28.6%. Analyzing the temperature of the particles at different mass flow rates revealed that as the mass flow rate of the inlet solution increased, both the temperature inside the chamber and the temperature of the particles decreased. Additionally, increasing the particle size from 50 μ m to 150 μ m led to a reduction in the temperature of the dried particles, with a 3% decrease in the temperature of the particles at the outlet.

Conclusions: The simulation results indicated that increasing both the milk mass flow rate and the diameter of the particles led to an increase in particle velocity and a decrease in both the chamber temperature and the temperature of the outlet particles. Additionally, increasing the diameter of the milk particles caused a reduction in the chamber pressure, whereas an increase in the milk mass flow rate resulted in an increase in the chamber pressure.

Keywords: Milk, Moisture, Spray dryer, CFD.

How to cite this article:

 \square

Ghafori, H., Karimian, H. (2025). CFD simulation of milk performance parameters effect on the physical indices of a spray dryer., *Innov. Food Technol.*, *12*(2). 163-181. https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7406.2201



^{مقاله} پژو^{مشی} شبیهسازی اثر پارامترهای عملکردی شیر تزریقشده بر شاخصهای فیزیکی محفظه خشککن پاششی بهروش CFD

حسن غفوری^۱^۵، حمید کریمیان^۲ ۱. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، واحد اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. ۲. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. (تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸، تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱/۱۰)

چکیدہ

یکی از انواع فرایندهای خشککردن، فرایند پاششی است که برای خشککردن محلولها استفاده میشود. در این روش، کیفیت و خواص مورد انتظار پودر خشکشده به پارامترهای طراحی، پارامترهای عملکردی و خواص محلول بستگی دارد. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر پارامترهای عملکردی محلول تزریقشده بر شاخصهای فیزیکی محفظه خشککن برای خشککردن شیر است. به همین منظور، اثر اندازه ذرات پاشششده در سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ و دبی محلول ورودی به خشککن در شش محفظه خشککن بهروش دینامیک سیالات محاسباتی شبیهسازی شد. این شبیهسازی با استفاده از نرمافزار RSYS fluent 18 محفظه خشککن بهروش دینامیک سیالات محاسباتی شبیهسازی شد. این شبیهسازی با استفاده از نرمافزار RSYS fluent 18 به افزایش سرعت، کاهش دمای داخل محفظه و کاهش دمای ذرات خروجی شده است. بیشترین میزان افزایش سرعت و بیشترین به افزایش سرعت، کاهش دمای داخل محفظه و کاهش دمای ذرات خروجی شده است. بیشترین میزان افزایش سرعت و بیشترین میزان کاهش دمای ذرات بهترتیب ۶۶٪ و ۵٪ بوده است. این در حالی است که با افزایش قطر ذرات منجر و با افزایش دبی جرمی شیر، فشار داخل محفظه افزایش یافته که بیشترین میزان افزایش سرعت و میشترین نشان داد که حدود ۵۰٪ از رطوبت محلول در قسمت استوانهای محفظه خشککن از ذرات خارج شده است. نشان داد که حدود ۲۵٪ از رطوبت محلول در قسمت استوانهای محفظه خشککن از ذرات خارج شده است.

واژههای کلیدی: شیر، رطوبت، خشککن پاششی، CFD.

^{*} نویسنده مسئول: h.ghafori569@iau.ac.ir

هر محصول، تحقيقات اختصاصي بهروش تجربي و شبیهسازی گزارش شده است؛ هرچه اختلاف دما بین هوای گرم و مواد خشک شونده بیشتر باشد مقدار انتقال حرارت به مواد خشکشونده بیشتر خواهد بود و سرعت خشکشدن نیز بیشتر می شود، اما چنانچه مقدار حرارت از حد مجاز تعیین شده بیشتر باشد، لایه خارجی مواد، سخت شده و کیقیت آن کاهش می یابد [۱۲]. سرعت جریان هوای ورودی از عوامل مهم در جذب رطوبت از سطح مواد خشکشونده است. هرچه سرعت جریان هوای ورودی بیشتر باشد سرعت جذب رطوبت نیز بیشتر خواهد بود [۱۳]. سطح مواد خشکشونده نیز در سرعت خشکشدن مؤثر هستند. هرچه مساحت مواد خشکشونده بیشر باشد سرعت خشکشدن نیز افزایش مییابد [۱۴]. افزایش سطح تماس با هوای گرم در خشککن پاششی به اندازه ذرات خروجی از نازل بستگی دارد. از عوامل دیگر در فرایند خشکشدن، فشار داخل محفظه خشککن است. هرچه فشار هوای پایینتر باشد نقطه جوش آب نیز کمتر خواهد بود؛ بنابراین با کم کردن فشار داخل محفظه خشککن، میتوان زمان ماند و دمای مورد نیاز خشککردن را پایین آورد. این عمل در مواد خشکشونده حساس به حرارت و ترکیبات طعم دهنده، بهدلیل کاهش آثار تخریبی حرارت، اهمیت زیادی دارد [۱۵]. در سالهای اخیر، روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به طور گسترده در تحقیقات مربوط به صنایع غذایی بهویژه در خشککنها استفاده شده است. بررسی توزیع اندازه ذرات، تجمع و رسوب بین فازهای پیوسته و گسسته

در مدلسازی دوفازی [۱۶]، بررسی مدلها آشفتگی جریان [۱۷]، اثر شرایط مرزی حرارتی بر رسوب و استحصال پودر [۱۸]، بهینهسازی هندسه خشککن و اثرات جریان همجهت یا مخالف خشککن پاششی [۱۹]، اثر برهمکنش ماده پاشیدهشده و هوا و فرایند جداسازی پودر از هوا در داخل سیکلون [۲۰]، نمونههایی از کاربرد روش CFD در شبیهسازی خشککنها است. با توجه به اینکه در خشککن پاششی دو فاز مایع و گاز در تعامل با یکدیگر هستند از دو رویکرد اویلراویلر و اویلر لاگرانژ برای شبیهسازی 199

خشککردن مواد با اهداف مختلفی ازجمله جلوگیری از فساد، کاهش حجم، بستهبندی، نگهداری و حملونقل آسان انجام می شود [۱-۳]. روش های طبیعی و غیرطبیعی مختلفی برای خشک کردن وجود دارد. یکی از روشهای خشککردن غیرطبیعی، استفاده از خشککن پاششی^۱ است. خشککن پاششی برای تهیه موادی مانند شیرخشک، پودر لبنیات، پودر قهوه و پودر میوه [۴] استفاده می شود. خشک کردن به این روش برای تولید نشاسته سیبزمینی برای اهداف مختلف در صنایع غذایی و غیرغذایی نیز گزارش شده است [۵]. خشک کردن پاششی براساس حذف رطوبت از محلول با استفاده از یک فضای گرم انجام می شود. فرایند خشک کردن پاششی شامل مراحل، اتمیزه کردن محلول، تبدیل قطره به ذره و جمع آوری ذرات از داخل محفظه است [۶ و ۷]. محلول توسط یک پمپ و نازل به قطرات ریز تبدیل می شود. سپس قطرات به داخل یک محفظه محتوی هوای گرم وارد و با تبخیر رطوبت، ذرات خشک تشکیل می شود. ذرات خشکشده در محفظه خشک کن توسط یک جداکننده سیکلونی، جدا و جمع آوری می شوند. عملکرد خشک کردن پاششی و خواص نهایی پودر خشکشده به شرایط اجرای هر کدام از مراحل بالا بستگی دارد [۸ و ۹] و برای هر نوع محصول، پارامترهای خشکشدن باید براساس ویژگیهای مورد انتظار برای پودر، بهینه شود [۱۰]. کیفیت محصول نهایی در خشککن پاششی به پارامترهای مختلفی مانند طراحی خشککن، پارامترهای عملکردی و خواص محصول بستگی دارد. پارامترهای طراحی خشککن به اندازه محفظه خشککن (اندازههای صنعتی یا آزمایشگاهی)، نوع جریان خشک کردن (جریان همسو، جریان مخالف، جریان متقاطع) و هندسه و شکل خشککن (ابعاد خشککن، و نسبت مقاطع) مرتبط است [۱۱]. پارامترهای عملکردی عمدتاً متناسب با عوامل ورودی مانند دمای ورودی هوا، دبی جرمی هوا، دبی جرمی خوراک، رطوبت و اندازه ذرات ورودی است [11]. بههمین منظور برای تعیین پارامترهای خشکشدن

۱. مقدمه

¹. Spray dryer

². Computational fluid dynamics

استفاده می شود. در روش اویلر اویلر، مواد پاشیده شده همانند هوای داخل خشککن بهصورت فاز پیوسته درنظر گرفته می شود. در این روش، رفتار کلی مواد پاشیده شده بررسی می شود. در روش اویلری لاگرانژی، مواد پاشیده شده به صورت یک فاز مجزا و هوای داخل خشککن بهصورت فاز پیوسته درنظر گرفته می شود [۲۱] و رفتار و مسیر تک ذرات پاشیده شده بررسی می شود [۲۲ و ۲۳]. در تحقیقی شبیه سازی الگوی جریان هوا در خشککن پاششی پایلوت با استفاده از تکنیک CFD و نرمافزار Ansys Fluent موردبررسی قرار گرفت. نتايج اين تحقيق كه با استفاده از نازل فشار هوا در بخش مخروطي محفظه خشككن انجام شد، نشان داد كه بين مقادير عددی و نتایج تجربی سرعت هوا ۵٪ تا ۷٪ اختلاف وجود دارد و همبستگی خوبی (%R2≤R2) بین آنها وجود دارد [۲۴]. در تحقیق انجامشده بهروش CFD مسیر حرکت ذرات شیر در داخل خشککن با رویکرد اویلر لاگرانژ بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ذرات درشتتر مدتزمان کمتری در داخل محفظه مىمانند و رطوبت آنها هم بيشتر است [٢۵]. شبیه سازی دوفازی خشککن پاششی به روش CFD با رویکرد اویلر لاگرانژ نشان داد که اکثر ذرات در داخل محفظه خشککن، دارای سرعتی بین ۱۸ m/s تا ۱۹ برای تمام دماهای مورد بررسی بودند [۲۶].

بررسی تحقیقات نشان داد که پارامترهای ورودی برای خشک کردن محلولهای مختلف اعم از ویژگیهای محلول تزریق شده و هوای گرم دمیده شده در محیط خشک کن پاششی روی کیفیت خشک کردن تأثیر مستقیم دارد و باید متناسب با خواص مورد انتظار پودر خشک شده بهینه شوند. از طرفی بهدلیل هزینه زیاد آزمایشهای تجربی برای بهینه کردن اثر پارامترهای ورودی روی فرایند خشک کردن در داخل محفظه نرمافزار و بهروش CFD انجام شده است. همچنین عمده تحقیقات انجام شده در زمینه خشک کن پاششی مربوط به بررسی اثر پارامترهای هوای ورودی مانند دبی، سرعت و دمای هوای داغ دمیده شده روی فرایند خشک شدن است و تحقیقات کمتری در زمینه اثر پارامترهای محلول پاشش شده مانند دبی

ورودی و اندازه ذرات محلول پاشش شده صورت گرفته است؛ ازاینرو در تحقیق حاضر اثر ویژگی های محلول تزریق شده روی شاخصه های فیزیکی داخل محفظه خشککن پاششی بهروش شبیه سازی برای خشک کردن شیر مطالعه و بررسی شد.

۲. مواد و روشها

در این مطالعه که به صورت شبیه سازی انجام شد، فشار، سرعت، دما و رطوبت در داخل محفظه خشککن پاششی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، اثر پارامترهای دبی جرمی محلول در شش سطح ^۳-۱۰×۱۰، ^۳-۱۰×۱۵، ^۳-۱۰×۲۰، ۲۰×۲۰، ۲۰×۲۵، ۳۰×۱۰-۳ و ۳۵×۱۰-۳ kg/s و اندازه ذرات یاشیدهشده در سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۲۷[m ا ۱۵۰ µ روی توزیع فشار، سرعت، رطوبت و دمای ذرات داخل محفظه خشک کن مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی نتایج شبیهسازی از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی استفاده شد و برای مقایسه میانگینها، از آزمون حداقل تفاوت معنادار 'LSD در سطح احتمال ۵٪ بهره گرفته شد. باتوجه به این که دو فاز مایع و گاز به داخل خشککن وارد می شوند، شبیه سازی به صورت دو فازی (مایع گاز) انجام شد و از آنجایی که در بررسی رفتار عملکردی، رفتار دسته ذرات تزریقشده به محفظه مورد ارزیابی قرار می گیرد و رفتار یک ذره ملاک ارزیابی نیست، از رویکرد اویلر اویلر برای شبیهسازی استفاده شد. سیال مورد استفاده شیر، با خواص ترموفیزیکی ثابت درنظر گرفته شد که به صورت فاز جداگانه در هوا تزریق و پخش شد. در انجام این تحقیق از نرمافزار Ansys Fluent 18 استفاده شد و بهینه ترین شرایط برای خشک کردن شیر با بررسی کانتورهای و نمودارهای مختلف فشار، سرعت، رطوبت و دما استخراج شد.

۲. ۱. معادلات حاکم

معادلات پیوستگی (بقای جرم)، معادله مومنتوم، معادله انتقال حرارت (پایداری انرژی) و معادله ویسکوزیته از نوع -k ٤ که در این شبیهسازی از آنها استفاده شد، مطابق معادلات ١ تا ۵ هستند.

¹. Least significant difference

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
⁽¹⁾

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{7}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho H u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left(u_j \tau_{ij} + k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \tag{(7)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$
^{(†}

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$
^(A)

۲.۲. حل عددی و شرایط مرزی

هندسه مسأله بهصورت سهبعدی و با استفاده از نرمافزار فلوئنت ترسیم شد. ابعاد درنظر گرفتهشده برای قطر و ارتفاع خشککن بهترتیب ۶۰ و ۹۰ ۹۰ و ارتفاع مخروط ۴۰ دان است. شکل ۱، هندسه مورد بررسی در تحقیق حاضر را نشان میدهد. فشار حرارتی دیواره محفظه خشککن برابر با صفر (دیواره عایق) درنظر گرفته شد. شرط مرزی سرعت ورودی در ورودی (قسمت بالای خشککن) و فشار خروجی (فشار گیج برابر با صفر) در خروجی (قسمت پایین خشککن) و شرط عدم لغزش در دیوارهها منظور شد. برای همگرایی بهتر، شرط عدم لغزش در دیوارهها منظور شد. برای همگرایی بهتر، استفاده شد. معیار همگرایی معادلات مومنتوم، سرعت محوری، سرعت شعاعی و انرژی، بهترتیب برابر با ^۶-۱۰، ^۶ در معادلات ذکرشده، ۱۱، $v \in w$ مؤلفههای سرعت در جهت در مهادلات ذکرشده، ۱۱، $v \in w$ مؤلفههای سرعت در جهت v as $v \in v$ as $v \in w$ as $v \in w$ by $v \in w$ by v = w by v = w

188



شکل ۱. هندسه خشککن مورد بررسی Fig 1. Geometry of the dryer under study

۲. ۳. شبکهبندی خشککن

توجه به این که مقدار متوسط پارامتر ضریب چولگی کمتر از ۰/۲۵ و مقدار متوسط پارامتر کیفیت متعامدبودن بالاتر از ۸۵/۰ است، کیفیت شبکهبندی بسیار خوب است.



شکل ۲. شبکهبندی خشک کن مورد بررسی Fig 2. Grid layout of the dryer under study

هندسه خشککن با استفاده از شبکههای ۴وجهی و ۶وجهی شبکهبندی شد (شکل ۲). آزمون استقلال مش برای ارزیابی تأثير شبكهبندى حوزه محاسباتي بر دماي خروجي محفظه انجام شد. معيار همگرايي اتخاذشده، اختلاف نسبي كمتر از ۰/۰۰۱ بین دو اندازه مش متوالی (RE<0.001٪) است که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است. مش انتخابی متشکل از ۸۱۵۹ عنصر و ۴۶۱۸۹ گره است که اختلاف نسبی ۰/۰۰۰۹ را نشان میدهد. استفاده از معیار همگرایی اختلاف نسبی بین دو اندازه مش متوالی، توسط سایر محققان [۲۸ و ۲۹] نیز استفاده شده است. علاوهبراین، کیفیت مش استفادهشده از طریق پارامترهای ضریب چولگی و کیفیت متعامدبودن ارزیابی گردید (شکل ۳). با

¹. Skewness

². Orthogonal quality

Mesh number	Number of node	Number of elements	Outlet temperature (K)	Relative difference	
1	43251	6752	325.25	-	
2	44120	6941	324.36	0.0027	
3	44973	7385	323.79	0.0017	
4	45672	7867	323.37	0.0013	
5	46189	8159	323.05	0.0009	
6	46756	8477	322.81	0.0007	

جدول ۱ . آزمون استقلال مش از شبکهبندی	
Table 1. Mesh Independence Test from Grid layout	

Mesh Metric	Orthogonal Quality		
🗌 Min	0.24924		
Max 🗌	0.99559		
Average	0.86571		
Standard Deviation	8.07e-002		

Mesh Metric	Skewness
🗌 Min	7.9568e-007
🗌 Max	0.8154
Average	0.21476
Standard Deviation	0.11402

شکل ۳. کیفیت مش استفادهشده **Fig 3.** Quality of used mesh

۳. ۴. اعتبارسنجي

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی از نتایج تجربی تحقیق انجام شده توسط روگرز [۳۰] استفاده شد. در این مقایسه، دمای هوای نقاط مختلف داخل محفظه خشک کن در امتداد محور طولی با نتایج تجربی مقایسه شد. برای این منظور دمای هوای ورودی به خشک کن در ۵ سطح مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل پیداست، حداکثر اختلاف بین

نتایج شبیه سازی حاضر و مقاله مورد بررسی، $\Lambda/\%$ و مربوط به دمای هوای ورودی $\Lambda^{0}\%$ است. میزان هم بستگی بین نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی در شکل ۵ نشان داده شده است. میزان هم بستگی بین 99 = R^2 و 96 = R^2 است که نشان دهنده هم بستگی مناسب بین نتایج است. زیائو و همکاران [1۵] هم برای راستی آزمایی نتایج شبیه سازی مدل پیشنهادی خود از نتایج تجربی تحقیق روگرز [۳۰] بهره بردند و نشان دادند که شبیه سازی انجام شده می تواند برای تشخیص دمای داخل محفظه خشک کن استفاده شود.







(۳۰ بررسی همبستگی نتایج شبیهسازی با مقاله مرجع (۳۰ **Fig 5.** Correlation analysis of simulation results with reference article [30]

۴. نتایج و بحث

داخل محفظه مورد بررسی قرار می گیرد. خلاصه جدول تجزیه واریانس مربوط به اثر اندازه ذرات پاشششده و دبی محلول بر شاخصهای میزان فشار، سرعت، دما و رطوبت ذرات، در جدول ۲ آورده شده است.

در این قسمت اثر پارامترهای مستقل اندازه ذرات پاشششده و دبی محلول روی توزیع فشار، سرعت، دما و رطوبت ذرات

جدول ۲. خلاصه جدول تجزیه آماری (میانگین مربعات) شاخصهای فشار، سرعت، دما و رطوبت ذرات Table 2. Summary of statistical analysis table (mean square) of pressure, velocity, temperature and humidity indices of particles

Source of changes	DF	Pressure	Velocity	Temperature	Moisture
Particle size	2	165.92**	2941/92**	357/54**	87/3**
Solution flow rate	5	159.62**	2578/35**	218/75**	34/19**
Particle size× Solution flow rate	10	5.64**	2659/21**	35/42**	43/37**

**: Indicates significance at the 1% level. ns: Indicates non-significance.

۵۳ است که فشار پایینی است. با توجه به این که هرچه فشار در داخل محفظه پایین تر باشد، تبخیر رطوبت از محلول بهتر صورت می گیرد، شرایط برای جدایش رطوبت در این شبیهسازی مناسب است. شکل ۶.ب کانتور سرعت ذرات را در محفظه خشککن نشان میدهد. ذرات با سرعت ۱ m/s وارد محفظه شده و در تماس با هوای گرم ورودی، سرعت می گیرد. بیشترین سرعت ذرات در فاصله ۲۰ cm رخ داده است و با انتشار ذرات به سمت پایین، از سرعت آنها کاسته شده است. سرعت ذرات در نیمه پایینی محفظه به صفر نزدیک شده و ذرات حالت معلق به خود می گیرند. شکل ۶.ج کانتور دمای ذرات را در محفظه خشککن نشان میدهد. همان طور که مشهود است، محلول با دمای محیط (۳۰۰k) وارد محفظه شده و با هوای دمیده شده (۳۴۸°K) برخورد کرده و دمای آن افزایش می یابد. بیشترین دما در داخل محفظه مربوط به ارتفاع ۳۰ cm بالای محفظه است که با توجه به تمایل حرکت حرارت به سمت بالا و همچنین قرارگیری محل ورود هوای داغ در قسمت بالایی محفظه، این پدیده قابل پیش بینی است. در خارج از این منطقه، دما بهصورت یکنواخت توزیع شده و دمای ذرات در زمان خروج از محفظه، K °۳۲۸ است. تجمیع نتایج کانتور سرعت و دمای ذرات در محفظه خشککن نشان میدهد که شیر یاشش شده، به سرعت از ناحیه هوای داغ ورودی خارج شده

از جدول تجریه آماری چنین استنباط می شود که اثر اندازه ذرات پاشش شده و دبی محلول و اثر برهم کنش دوگانه (اندازه ذرات \times دبی محلول)، بر تمامی شاخصهای مورد ارزیابی در سطح احتمال ۱٪ معنادار است. بنابراین با توجه به تعداد زیاد حالتهای انجامشده و کانتورهای متعدد، در ادامه یک نمونه از نتایج بهصورت کانتورها بررسی و باقی نتایج بهصورت نمودار مطالعه می شوند. پارامترهای فرایندی برای محلول با قطر ذرات 4 ۰m و دبی جرمی ورودی kg/s ^{-۳} ۱۰×۱۰ در هوای دمیده شده با دمای ۳۴۸[°]K و دبی جرمی ۲×۱۰^{-۳} kg/s، در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶-الف کانتور فشاز را در محفظه خشککن نشان میدهد. بیشترین فشار در ناحیه پاشش شیر اتفاق افتاده است. فضای درون محفظه از نظر فشار به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت بالایی محفظه، یک ناحیه کمفشار با فشار نزدیک به فشار محیط و ناحیه پایینی محفظه، یک ناحیه پرفشارتر را تشکیل دادهاند. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققان [۲۴] گزارش شده است. دلیل این پدیده به خاطر جهت حرکت مواد و جریان هوا است. جهت جریان از بالا به پایین، یک فشار حرکتی را در داخل مجفظه ایحاد میکند که منجر به ایجاد مکش در قسمت بالایی محفظه می شود. این فشار باعث ایجاد نواحی کمفشار و پرفشار در قسمت بالایی و یایینی محفظه شده است. حداکثر فشار داخل محفظه Pa

و با ورود به ناحیه با دمای پایین تر، از سرعت آن کاسته شده و زمان بیشتری در معرض هوای گرم یکنواخت قرار می گیرد. از آنجایی که برای حفظ کیفیت پودر خشکشده و افزایش راندمان خشک کردن، سعی می شود تا زمان تماس مواد با هوای بسار داغ کاهش یابد و در عوض از هوای با دمای کمتر و زمان ماند بیشتر استفاده شود، در این شبیه سازی این مهم حاصل شده است.

کانتور رطوبت ذرات در محفظه خشک کن در شکل ۶۰ نشان داده شده است. شیر با رطوبت ۸۵٪ وارد محفظه شده و در مجاورت با هوای گرم به تدریج از رطوبت آن کاسته شده است.



ذرات با طیکردن طول استوانه خشککن، حدود ۵۰٪ از رطوبت خود را از دست دادهاند و باقی رطوبت در قسمت مخروطی خشککن از ذرات خارج شده است. دلیل این امر، اختلاف دما بین شیر و هوای گرم ورودی زیاد است و زمان زیادی برای نفوذ حرارت به داخل ذرات و همدما شدن آنها نیاز است. در این زمان، ذرات مسیر استوانهای شکل محفظه را طی کرده و سرعت خشکشدن کم است، ولی پس از گذشت این مدت، با افزایش دمای ذرات، سرعت خشکشدن نیز افزایش یافته است. در تحقیق انجام شده توسط زیائو و همکاران [1۵] مشابه با این نتایج گزارش شده است.



الف) كانتور فشار

ب) کانتور سرعت



د) کانتور رطوبت

شکل ۶. پارامترهای فرایندی داخل محفظه خشککن برای محلول با قطر ذرات ۳۵ ۵۰ Fig 6. Process parameters inside the drying chamber for a solution with a particle diameter of 5 0 μ m

> شکل ۷ نمودار فشار داخل محفظه خشککن را در امتداد محور عمودی خشککن نشان میدهد. در این شکل اثر پارامترهای دبی جرمی و اندازه ذرات شیر روی فشار داخل محفظه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، فشار ورودی شیر به محفظه ۱۹۰ Pa بوده و به محض ورود به محفظه، فشار افت کرده است و کمترین فشار در فاصله ۲۰ تا ۳۰ cm اتفاق افتاده است. در ادامه مسیر، تا فاصله n ۱، فشار متعادل شده و حالت یکنواخت تری به خود گرفته است و فشار در خروج از محفظه، با فشار اتمسفر برابر شده است. این نتایج با نتایج کانتور فشار در شکل ۶ الف مطابقت دارد.

> در یک اندازه ذره ثابت، با افزایش دبی جرمی شیر از kg/s ۰/۰۱ به kg/s ۸/۰۳۵ kg/s ، فشار داخل محفظه افزایش یافته است. بیشترین میزان افزایش فشار ۶۵٪ بوده است. دلیل این یدیده آن است که افزایش دبی جرمی محلول و ثابتماندن

اندازه ذرات پاشیده شده به معنی افزایش تعداد ذرات در واحد حجم است. هرچه تعداد ذرات در واحد حجم افزایش یابد، فاصله آنها از هم كمتر شده و منجر به برخورد آنها و افزایش نیروی برهم کنش ذرات می شود و هرچه نیروی برهم کنش ذرات بیشتر باشد، فشار داخل محفظه افزایش می یابد.

 μm در یک دبی جرمی ثابت، با افزایش قطر ذرات شیر از ۵۰ به µ ۱۵۰m، فشار داخل محفظه کاهش یافته است. بیشترین میزان کاهش فشار ۳۶٪ بوده است. این رخداد به این صورت قابل تفسیر است که ثابتبودن دبی جرمی محلول و افزایش اندازه ذرات پاشیده شده به معنی کاهش تعداد ذرات در یک حجم معین است. با کاهش تعداد ذرات در یک حجم معین و افزایش فاصله بین ذرات، برخورد بین ذرات و نیروی برهمکنش آنها کاهش یافته که منجر به كاهش فشار داخل محفظه شده است.







شکل ۸ نمودار سرعت ذرات را در امتداد محور عمودی خشککن نشان میدهد. نمودارها حاکی از آن هستند که با ورود ذرات به خشککن و در تماس با هوای گرم دمیدهشده، سرعت آنها افزایش یافته و در فواصل ۲۰ تا ۳۰ ۳۰ به حداکثر مقدار خود میرسد. در ادامه مسیر از سرعت ذرات کاسته شده و کمترین سرعت در انتهای مسیر استوانهای محفظه رخ داده است. در قسمت خروجی بهدلیل قیفی شکل بودن محفظه و کوچکشدن دهانه خروجی، حالت ونتوری اتفاق افتاده و سرعت ذرات افزایش یافته است.

kg/s در یک اندازه ذره ثابت، با افزایش دبی جرمی شیر از kg/s در یک اندازه ذره ثابت، با افزایش دبی جرمی شیر از kg/s است. باتوجه به این که ابعاد روزنه ورودی محلول در طول شبیه سازی ثابت فرض شده است، بر اساس رابطه Q = A = Q افزایش سرعت ذرات شده V، افزایش دبی ورودی منجر به افزایش سرعت ذرات شده است. این افزایش سرعت در بیشترین مقدار، ۱۵/۵٪ بود.





a. Particle size: 50µm



c. Particle size: 150µm

تغییرات دمای داخل محفظه خشککن در امتداد محور مرکزی در شکل ۹ نشان داده شده است. بررسی نمای کلی نمودارها نشان میدهد که با پاشش محلول، دمای آن نیز افزایش یافته و هرچه ذرات جلوتر میروند بر دمای آنها افزوده میشود، بهنحوی که بیشترین دما در قسمت خروجی حاصل شده است.

بررسی دمای ذرات در دبیهای جرمی مختلف حاکی این واقعیت است که با افزایش دبی جرمی محلول ورودی، دمای

داخل محفظه و دمای ذرات کاهش پیدا کردهاند. افزایش دبی از ۲۰۱۸ kg/s ۲۰/۰۱ ، منجربه کاهش دمای ذرات خروجی به اندازه ۵٪ شده است. به وضوح قابل درک است که درصورت ثابتبودن دمای هوای ورودی، با افزایش دبی محلول، مقدار رطوبت بیشتری وارد محفظه شده که برای حذف آن انتقال جرم و انتقال حرارت بیشتری انجام می گیرد و درنهایت دمای کلی محفظه و ذرات کاهش می یابد. در تحقیق انجام شده توسط جورج و همکاران [۲۲]، تحلیل مشابهی برای انتقال حرارت گزارش شده است.

شکل Λ . سرعت داخل محفظه خشککن در امتداد محور عمودی **Fig 8.** Velocity inside the drying chamber along the vertical axis

در یک دبی مشخص، هرچه اندازه ذرات کوچکتر باشد، سطح تماس بین هوای گرم و ذرات بیشتر است که منجربه انتقال حرارت بهتر به ذرات و انتقال رطوبت بیشتر از ذرات میشود. مقایسه بین سه نمودار در یک دبی جرمی مشخص نشان میدهد که با افزایش اندازه ذرات از ۵۰m به ۱۵۰۳ ب دمای ذرات خشکشده کاهش یافته است به گونهای که دمای ذرات خشکشده در قسمت خروجی ۳٪ کاهش داشته است.

۱۷۸







b. Particle size: 100µm



c. Particle size: 150µm

شکل ۹. دمای داخل محفظه خشککن در امتداد محور عمودی Fig 9. Temperature inside the drying chamber along the vertical axis

۵. نتیجهگیری

در این تحقیق اثر دبی و اندازه ذرات محلول ورودی روی فشار، سرعت، دما و رطوبت داخل محفظه خشککن پاششی بهروش CFD بررسی شد. نتایج شبیهسازی نشان داد: با افزایش قطر ذرات شیر از ۵۰m µ به ۱۵۰۳ µ، فشار داخل محفظه کاهش و با افزایش دبی جرمی شیر از ۱۸۰۳ kg/s به ۰/۰۳۵ kg/s محفظه افزایش یافته است. این افزایش فشار داخل محفظه، با کاهش جداسازی رطوبت از محلول نیز همراه بوده است.

افزایش دبی جرمی شیر و افزایش قطر ذرات منجربه افزایش سرعت ذرات شده است. افزایش دبی جرمی و افزایش قطر ذرات بهترتیب از ۰/۰۱ kg/s به μ ۵۰m به ۰/۰۳۵ g/۶۶ و ۱۵۰m ، منجربه افزایش سرعت به میزان ۶۶٪ گردید.

افزایش دبی جرمی محلول ورودی و افزایش اندازه ذرات، دمای داخل محفظه و دمای ذرات خروجی را کاهش دادهاند. افزایش دبی از ۸ kg/s ۲۰/۰۱ به ۸/۰۳۵ kg/s، منجربه کاهش دمای ذرات خروجی به اندازه ۵٪ و افزایش اندازه ذرات از μ ۵۰m به ۱۵۰m به منجربه کاهش دمای ذرات خروجی به اندازه ۳٪ شده است.

بررسی نتایج شبیه سازی رطوبت نشان داد که حدود ۵۰٪ از رطوبت محلول در قسمت استوانه محفظه خشککن و بقیه رطوبت در قسمت مخروطی خشککن از ذرات خارج شده است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] Bhattacharjee, S., Mohanty, P., Sahu, J.K., & Sahu, J.N. (2024). A critical review on drying of food materials: Recent progress and key challenges. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 158, 107863.

https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.202 4.107863.

[2] Wang, J.F., Brown, C., & Cleland, D.J. (2018). Heat pump heat recovery options for food industry dryers. *International Journal of Refrigeration*, 86, 48–55.

https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.028.

[3] Abedi, E. & Ghafori, H. (2024). Simulation of fluidized bed dryer using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*, 13(4), 13-22. doi: 10.22034/jrmam.2024.14697.696.

[In persian]

[4] Benavides, A, Cubillos, A., & Gómez, A. (2021). Spray drying experiments and CFD simulation of guava juice formulation. *Drying Technology*, 39, 450–465.

https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1708382.

[5] Paes, T., Maria, C., Franco, L., & Leonel, M. (2019). Gelatinized sweet potato starches obtained at different preheating temperatures in a spray dryer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, 1339-1346.

https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.105.

[6] Patel, R.P., Patel, M.P., & Suthar, A.M. (2009). Spray drying technology: An overview. *Indian Journal of Science and Technology*, 2(10), 44-47. https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2009/v2i10.3.

[7] Nandiyanto, A.B.D, & Okuyama, K. (2011). Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to sub micrometer size ranges. *Advanced Powder Technology*; 22(1), 1-19. https://doi.org/10.1016/j.apt.2010.09.011

[8] Cal, K., & Sollohub, K. (2010). Spray drying technique. I: Hardware and process parameters.

Journal of Pharmaceutical Sciences, 99(2), 575-586. https://doi.org/10.1002/jps.21886

[9] Barbosa-Cánovas G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2006). *Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality.* Springer Science & Business Media.

[10] Anandharamakrishnan, C., & Ishwarya, S. P.
(2015). Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation. John Wiley & Sons, Ltd.
[11] Gutierrez Suarez, J.A., Galeano Uruena, C.H., & Gomez Mejia, A. (2025). Parametric CFD Study of Spray Drying Chamber Geometry: Part I— Effects on Airflow Dynamics. Chem. Engineering, 9(5), 1-26.

https://doi.org/10.3390/chemengineering9010005.

[12] Demissie P., Hayelom, M., Kassaye A., Hailesilassie A., Gebrehiwot M., & Vanierschot, M. (2019). Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer. *Energy Procedia*, 158, 1128–1134.

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.278.

[13] Islam, M., Islam, I., Tusar, M., & Hamza, A.N. (2019). Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type Effect of cover design on moisture removal rate of cabinet type solar food drying application. *Energy Procedia*. 160, 769–776. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.181.

[14] Filková, I., Huang, L.X., & Mujumdar, A.S. (2015). Industrial spray drying systems, in: Mujumdar, A.S. (Ed.). *Handbook of industrial drying*, (pp. 191-226). CRC Press, Boca Raton.

[15] Xiao, J., Yang, S., George, O.A., Putranto, A., Wu, W.D., & Chen, X.D. (2019). Numerical Simulation of Mono-Disperse Droplet Spray Dryer: Coupling Distinctively Different Sized Chambers. *Chemical Engineering Science.*, 200, 12-26. http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2019.01.030.

[16] Buchholz, M., Haus, J., Pietsch-Braune, S., Kleine J^{*}ager, F., Heinrich, S. (2022). CFD-aided population balance modeling of a spray drying process. *Adv. Powder Technol.* 33.

https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103636.

<u>ک____</u>

[17] Hernandez, B., Martín, M., Gupta, P. (2021). Numerical study of airflow regimes and instabilities produced by the swirl generation chamber in counter-current spray dryers. *Chem. Eng. Res. Des.* 176, 89–101.

https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.09.024.

[18] Moradi Maryamnegari, S., Ashrafizadeh, A., Baake, E., Guglielmi, M. (2022). Effects of thermal boundary conditions on the performance of spray dryers. *J. Food Eng.* 338. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111250.

[19] Hernandez, B., Pinto, M.A., Martín, M. (2022). Generation of a surrogate compartment model for counter-current spray dryer. Fluxes and momentum modeling. *Comput. Chem. Eng.* 159. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.1 07664.

[20] Kuriakose, R, & Anandharamakrishnan, C. (2010). Computational fluid dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. *Trends Food Sci Technol.*, 21, 383–398. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.009.

[21] Lo, S. (2005). Application of Computational Fluid Dynamics to Spray Drying, *Dairy Science and Technology*, 85, 353-359.

https://doi.org/10.1051/lait:2005024.

[22] Jamaleddine T.J., & Ray M.B. (2010). Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: a review. *Dry Technology*, 28, 120–154.

http://dx.doi.org/10.1080/07373930903517458.

[23] Anandharamakrishnan, C. (2007). *Computational fluid dynamics in food processing, 1st edn.* Springer, London.

[24] Roustapour, O.R., Hosseinalipour, M., Gazor, H.R., Salehi. A. (2024). Computational fluid dynamics simulation of air flow in a spray dryer containing wall air pressure nozzle. *Agricultural Engineering International*: CIGR Journal, 26(3), 134-147.

[25] Sefidan, l.M., Sellier, M., Hewett, J.N., Abdollahi, A., Willmott, G.R., Becker. S.M. (2022). Numerical model to study the statistics of whole milk spray drying. *Powder Technology*, 411(1-2), 117923.

http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117923.

[26] Coimbra, J.C., Lopes, L.C., Cotrim, W.S., Prata. D.M. (2024). CFD modeling of spray drying of fresh whey: Influence of inlet air temperature on drying, fluid dynamics, and performance indicators. *Digital Chemical Engineering*, 12, 100178. http://dx.doi.org/10.1016/j.dche.2024.100178.

[27] Keogh, K., Murray, C., Kelly, J., & O'Kennedy, B. (2004). Effect of the particle size of spray-dried milk powder on some properties of chocolate. *Dairy Science & Technology*, 84(4), 375-384. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2004013.

[28] Coimbra, J.C., Martins, M.A., Oliveira, P.S., Minim, L.A. (2021). The potential use of a gyroid structure to represent monolithic matrices for bioseparation purposes : fluid dynamics and mass transfer analysis via CFD. *Sep. Purif. Technol.* 254, 117594.

https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117594.

[29] Luo, J., Chen, L., Min, T., Shan, F., Kang, Q., Tao, W. (2020). Macroscopic transport properties of Gyroid structures based on pore-scale studies : permeability, diffusivity and thermal conductivity. Int. *J. Heat. Mass Transf.* 146, 118837. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.201 9.118837.

[30] Rogers, S. (2011). Developing and utilizing a mini food powder producion facility to produce industrially relevant particles for functionality testing. *Ph.D thesis*, Monash University, Australia.
[31] George, O.A., Chen, X.D., Xiao, J., Woo, M., & Che, L. (2015). An effective rate approach to modeling single-stage spray drying. *AIChE J.*, 61, 4140–4151. http://dx.doi.org/10.1002/aic.14940.