

Research Article

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

Hasan Ghafori^{1*}, Hamid Karimian²

1. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2. 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)

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 10×10^{-3} , 15×10^{-3} , 20×10^{-3} , 25×10^{-3} , 30×10^{-3} and 35×10^{-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 μm to 150 μm 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 $Q=A \times V$ 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 μm to 150 μm 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 μm to 150 μm 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:

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 پژوهشی

شبیه‌سازی اثر پارامترهای عملکردی شیر تزریق‌شده بر شاخص‌های فیزیکی محفظه خشک‌کن پاششی به‌روش CFD

حسن غفوری^{۱*}، 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)

چکیده

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 ۱۵۰ μm و دبی محلول ورودی به خشک‌کن در شش سطح 10×10^{-3} ، 15×10^{-3} ، 20×10^{-3} ، 25×10^{-3} ، 30×10^{-3} و 35×10^{-3} kg/s روی توزیع فشار، سرعت، دما و رطوبت ذرات داخل محفظه خشک‌کن به‌روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS fluent 18 به‌صورت دوفازی و به‌روش اویلر-اویلر انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش دبی جرمی شیر و افزایش قطر ذرات منجر به افزایش سرعت، کاهش دمای داخل محفظه و کاهش دمای ذرات خروجی شده است. بیشترین میزان افزایش سرعت و بیشترین میزان کاهش دمای ذرات به ترتیب ۶۶٪ و ۵٪ بوده است. این در حالی است که با افزایش قطر ذرات شیر، فشار داخل محفظه کاهش و با افزایش دبی جرمی شیر، فشار داخل محفظه افزایش یافته که بیشترین میزان افزایش فشار ۶۵٪ بوده است. همچنین نتایج نشان داد که حدود ۵۰٪ از رطوبت محلول در قسمت استوانه‌ای محفظه خشک‌کن از ذرات خارج شده است.

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

۱. مقدمه

خشک کردن مواد با اهداف مختلفی از جمله جلوگیری از فساد، کاهش حجم، بسته‌بندی، نگهداری و حمل‌ونقل آسان انجام می‌شود [۱-۳]. روش‌های طبیعی و غیرطبیعی مختلفی برای خشک کردن وجود دارد. یکی از روش‌های خشک کردن غیرطبیعی، استفاده از خشک‌کن پاششی^۱ است. خشک‌کن پاششی برای تهیه موادی مانند شیرخشک، پودر لبنیات، پودر قهوه و پودر میوه [۴] استفاده می‌شود. 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 می‌شود. فرایند خشک کردن پاششی شامل مراحل، اتمیزه کردن محلول، تبدیل قطره به ذره و جمع‌آوری ذرات از داخل محفظه است [۶ و ۷]. محلول توسط یک پمپ و نازل به قطرات ریز تبدیل می‌شود. سپس قطرات به داخل یک محفظه محتوی هوای گرم وارد و با تبخیر رطوبت، ذرات خشک تشکیل می‌شود. ذرات خشک‌شده در محفظه خشک‌کن توسط یک جداکننده سیکلونی، جدا و جمع‌آوری می‌شوند. 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 خشک شدن 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 [۱۱]. به همین منظور برای تعیین پارامترهای خشک شدن

هر محصول، تحقیقات اختصاصی به روش تجربی و شبیه‌سازی گزارش شده است؛ هرچه اختلاف دما بین هوای گرم و مواد خشک‌شونده بیشتر باشد مقدار انتقال حرارت به مواد خشک‌شونده بیشتر خواهد بود و سرعت خشک شدن نیز بیشتر می‌شود، اما چنانچه مقدار حرارت از حد مجاز تعیین شده بیشتر باشد، لایه خارجی مواد، سخت شده و کیفیت آن کاهش می‌یابد [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 خشک شدن مؤثر هستند. هرچه مساحت مواد خشک‌شونده بیشتر باشد سرعت خشک شدن 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 خشک شدن، 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 خشک کردن را پایین آورد. این عمل در مواد خشک‌شونده حساس به حرارت و ترکیبات طعم‌دهنده، به دلیل کاهش آثار تخریبی حرارت، اهمیت زیادی دارد [۱۵]. در سال‌های اخیر، روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌طور 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 آشفته‌گی 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 پاشیده شده 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 اویلر-اویلر و اویلر-لاگرانژ برای شبیه‌سازی

^۱. Spray dryer^۲. Computational fluid dynamics

ورودی و اندازه ذرات محلول پاشش‌شده صورت گرفته است؛ از این رو در تحقیق حاضر اثر ویژگی‌های محلول تزریق‌شده روی شاخصه‌های فیزیکی داخل محفظه خشک‌کن پاششی به‌روش شبیه‌سازی برای خشک‌کردن شیر مطالعه و بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

در این مطالعه که به‌صورت شبیه‌سازی 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 $10^{-3} \times 10$ ، $10^{-3} \times 15$ ، $10^{-3} \times 20$ ، $10^{-3} \times 25$ ، $10^{-3} \times 30$ و $10^{-3} \times 35$ kg/s و اندازه ذرات پاشیده‌شده در سه سطح $50 \mu\text{m}$ ، 100 و 150 [۲۷] روی توزیع فشار، سرعت، رطوبت و دمای ذرات داخل محفظه خشک‌کن 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^۱ LSD در سطح احتمال ۵٪ بهره گرفته شد. باتوجه به این که دو فاز مایع و گاز به داخل خشک‌کن وارد می‌شوند، شبیه‌سازی به‌صورت دو فازی (مایع/گاز) انجام شد و از آنجایی که در بررسی رفتار عملکردی، رفتار دسته ذرات تزریق‌شده به محفظه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و رفتار یک ذره ملاک ارزیابی نیست، از رویکرد اوایلر اوایلر برای شبیه‌سازی استفاده شد. سیال مورد استفاده شیر، با خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر 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 بهینه‌ترین شرایط برای خشک‌کردن شیر با بررسی کانتورهای و نمودارهای مختلف فشار، سرعت، رطوبت و دما استخراج شد.

۲.۱. معادلات حاکم

معادلات پیوستگی (بقای جرم)، معادله مومنوم، معادله انتقال حرارت (پایداری انرژی) و معادله ویسکوزیته از نوع k- ϵ که در این شبیه‌سازی از آنها استفاده شد، مطابق معادلات ۱ تا ۵ هستند.

استفاده می‌شود. در روش اوایلر اوایلر، مواد پاشیده‌شده همانند هوای داخل خشک‌کن به‌صورت فاز پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در این روش، رفتار کلی مواد پاشیده‌شده بررسی می‌شود. در روش اوایلر لاگرانژی، مواد پاشیده‌شده به‌صورت یک فاز مجزا و هوای داخل خشک‌کن به‌صورت فاز پیوسته در نظر گرفته می‌شود [۲۱] و رفتار و مسیر تک ذرات پاشیده‌شده بررسی می‌شود [۲۲ و ۲۳]. در تحقیقی شبیه‌سازی الگوی جریان هوا در خشک‌کن پاششی پایلوت با استفاده از تکنیک CFD و نرم‌افزار Ansys Fluent مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق که با استفاده از نازل فشار هوا در بخش مخروطی محفظه خشک‌کن انجام شد، نشان داد که بین مقادیر عددی و نتایج تجربی سرعت هوا ۵٪ تا ۷٪ اختلاف وجود دارد و هم‌بستگی خوبی ($R^2 \geq 95\%$) بین آنها وجود دارد [۲۴]. در تحقیق انجام‌شده به‌روش CFD مسیر حرکت ذرات شیر در داخل خشک‌کن با رویکرد اوایلر لاگرانژ بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ذرات درشت‌تر مدت‌زمان کمتری در داخل محفظه می‌مانند و رطوبت آنها هم بیشتر است [۲۵]. شبیه‌سازی دوفازی خشک‌کن پاششی به‌روش CFD با رویکرد اوایلر 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 خشک‌کردن محلول‌های مختلف اعم از ویژگی‌های محلول تزریق‌شده و هوای گرم دمیده‌شده در محیط خشک‌کن پاششی روی کیفیت خشک‌کردن تأثیر مستقیم دارد و باید متناسب با خواص مورد انتظار پودر خشک‌شده بهینه شوند. از طرفی به‌دلیل هزینه زیاد آزمایش‌های تجربی برای بهینه‌کردن اثر پارامترهای ورودی روی فرایند خشک‌کردن در داخل محفظه خشک‌کن، بسیاری از تحقیقات به‌صورت شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار و به‌روش CFD انجام شده است. همچنین عمده تحقیقات انجام‌شده در زمینه خشک‌کن پاششی مربوط به بررسی اثر پارامترهای هوای ورودی مانند دبی، سرعت و دمای هوای داغ دمیده‌شده روی فرایند خشک‌شدن است و تحقیقات کمتری در زمینه اثر پارامترهای محلول پاشش‌شده مانند دبی

^۱. Least significant difference

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho H u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} (u_j \tau_{ij} + k \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (۳)$$

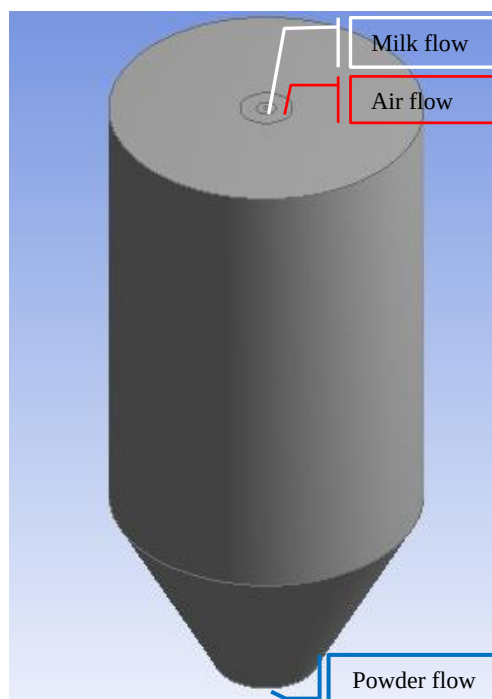
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (۵)$$

۲.۲. حل عددی و شرایط مرزی

هندسره مسأله به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار فلونت ترسیم شد. ابعاد در نظر گرفته‌شده برای قطر و ارتفاع خشک‌کن به‌ترتیب ۶۰ و ۹۰ cm و ارتفاع مخروط ۴۰ cm است. شکل ۱، هندسه مورد بررسی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. فشار حرارتی دیواره محفظه خشک‌کن برابر با صفر (دیواره عایق) در نظر 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، از روش بالادست مرتبه دوم در معادله مومنتوم و انرژی استفاده شد. معیار همگرایی معادلات مومنتوم، سرعت محوری، سرعت شعاعی و انرژی، به‌ترتیب برابر با 10^{-6} ، 10^{-6} ، 10^{-9} منظور شد.

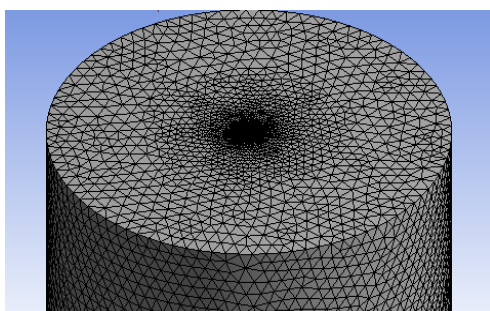
در معادلات ذکر شده، u ، v و w مؤلفه‌های سرعت در جهت x ، y و z برحسب ρ ؛ m/s چگالی برحسب P ؛ kg/m^3 فشار برحسب g ؛ Pa ؛ شتاب گرانش زمین برحسب σ و μ ؛ m/s^2 لزجت برحسب G_k ؛ m^2/s بیانگر تولید انرژی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط جریان، G_b بیانگر تولید انرژی ناشی از بویانسی (این شاخصه برای جریان‌های بدون جاذبه و انتقال حرارت، صفر است)، Y_M بیانگر تولید انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان (این شاخصه برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر، صفر است)، σ_k و σ_ε اعداد پرانتل متناسب با k و ε هستند، S_k و S_ε هم شاخصه‌های چشمه قابل تعریف توسط کاربر هستند. مقادیر ثابت C به‌صورت تجربی برحسب نوع جریان به‌دست آمده است.



شکل ۱. هندسه خشک‌کن مورد بررسی

Fig 1. Geometry of the dryer under study

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



شکل ۲. شبکه‌بندی خشک‌کن مورد بررسی

Fig 2. Grid layout of the dryer under study

۳.۲. شبکه‌بندی خشک‌کن

هندسه خشک‌کن با استفاده از شبکه‌های ۴وجهی و ۶وجهی و شبکه‌بندی شد (شکل ۲). آزمون استقلال مش برای ارزیابی تأثیر شبکه‌بندی حوزه محاسباتی بر دمای خروجی محفظه انجام شد. معیار همگرایی اتخاذشده، اختلاف نسبی کمتر 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^۱ و کیفیت متعامدبودن^۲ ارزیابی گردید (شکل ۳). با

^۱. Skewness

^۲. Orthogonal quality

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

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

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

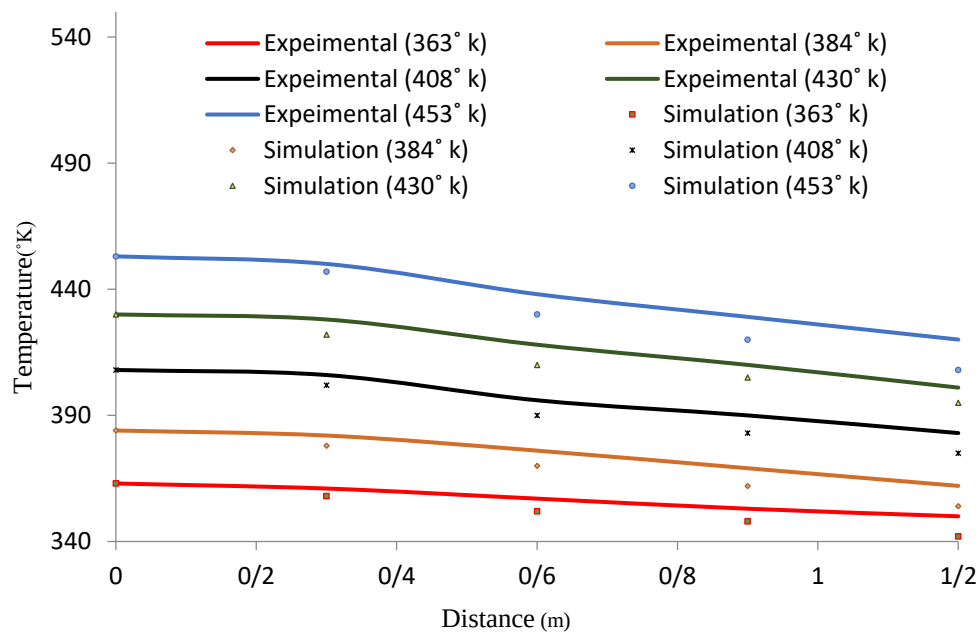
شکل ۳. کیفیت مش استفاده‌شده

Fig 3. Quality of used mesh

نتایج شبیه‌سازی حاضر و مقاله مورد بررسی، ۸/۳٪ و مربوط به دمای هوای ورودی 393°K است. میزان هم‌بستگی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی در شکل ۵ نشان داده شده است. میزان هم‌بستگی بین $R^2 = 99$ و $R^2 = 96$ است که نشان‌دهنده هم‌بستگی مناسب بین نتایج است. زیائو و همکاران [۱۵] هم برای راستی‌آزمایی نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی خود از نتایج تجربی تحقیق روگرز [۳۰] بهره بردند و نشان دادند که شبیه‌سازی انجام‌شده می‌تواند برای تشخیص دمای داخل محفظه خشک‌کن استفاده شود.

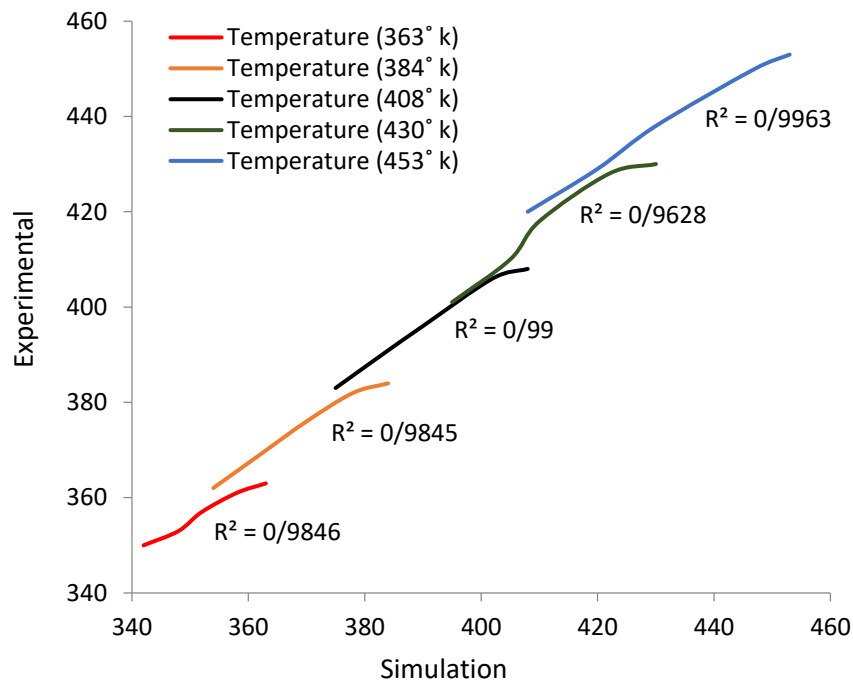
۴.۳. اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی از نتایج تجربی تحقیق انجام‌شده توسط روگرز [۳۰] استفاده شد. در این مقایسه، دمای هوای نقاط مختلف داخل محفظه خشک‌کن در امتداد محور طولی با نتایج تجربی مقایسه شد. برای این منظور دمای هوای ورودی به خشک‌کن در ۵ سطح مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل پیداست، حداکثر اختلاف بین



شکل ۴. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی با مقاله مرجع [۳۰]

Fig 4. Evaluation of simulation results with reference paper [30]



شکل ۵. 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 می‌گیرد. 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**

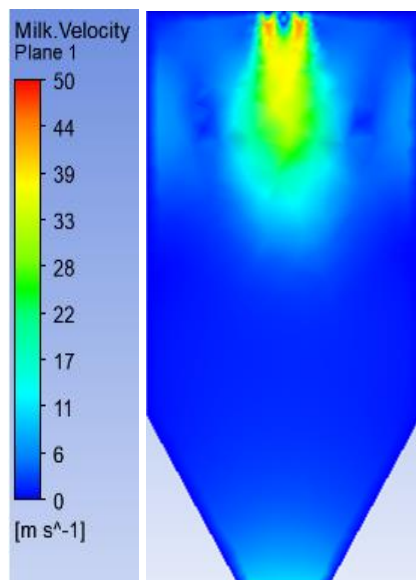
** : Indicates significance at the 1% level.

ns: Indicates non-significance.

۵۳ است که فشار پایینی است. با توجه به این که هرچه فشار در داخل محفظه پایین‌تر باشد، تبخیر رطوبت از محلول بهتر صورت می‌گیرد، 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 می‌گیرد. 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 می‌گیرند. شکل ۶ ج کانتور دمای ذرات را در محفظه خشک‌کن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است، محلول با دمای محیط (۳۰۰ K) وارد محفظه شده و با هوای دمیده‌شده (۳۴۸ K) برخورد کرده و دمای آن افزایش می‌یابد. 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 پیش‌بینی است. در خارج از این منطقه، دما به‌صورت یکنواخت توزیع شده و دمای ذرات در زمان خروج از محفظه، ۳۲۸ K است. تجمیع نتایج کانتور سرعت و دمای ذرات در محفظه خشک‌کن نشان می‌دهد که شیر پاشش‌شده، به سرعت از ناحیه هوای داغ ورودی خارج شده

از جدول تجربه آماری چنین استنباط می‌شود که اثر اندازه ذرات پاشش‌شده و دبی محلول و اثر برهم‌کنش دوگانه (اندازه ذرات × 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 می‌شوند. پارامترهای فرایندی برای محلول با قطر ذرات ۵۰ μm و دبی جرمی ورودی kg/s 10×10^{-3} در هوای دمیده‌شده با دمای ۳۴۸ K و دبی جرمی kg/s 2×10^{-3} ، در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶-الف کانتور فشار 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 محفظه ایجاد می‌کند که منجر به ایجاد مکش در قسمت بالایی محفظه می‌شود. این فشار باعث ایجاد نواحی کم‌فشار و پرفشار در قسمت بالایی و پایینی محفظه شده است. حداکثر فشار داخل محفظه Pa

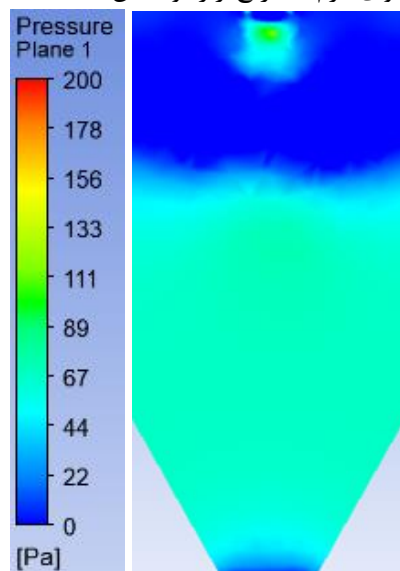
ذرات با طی کردن طول استوانه خشک‌کن، حدود ۵۰٪ از رطوبت خود را از دست داده‌اند و باقی رطوبت در قسمت مخروطی خشک‌کن از ذرات خارج شده است. دلیل این امر، اختلاف دما بین شیر و هوای گرم ورودی زیاد است و زمان زیادی برای نفوذ حرارت به داخل ذرات و هم‌دما شدن آنها نیاز است. در این زمان، ذرات مسیر استوانه‌ای شکل 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 انجام‌شده توسط زیاو و همکاران [۱۵] مشابه با این نتایج گزارش شده است.



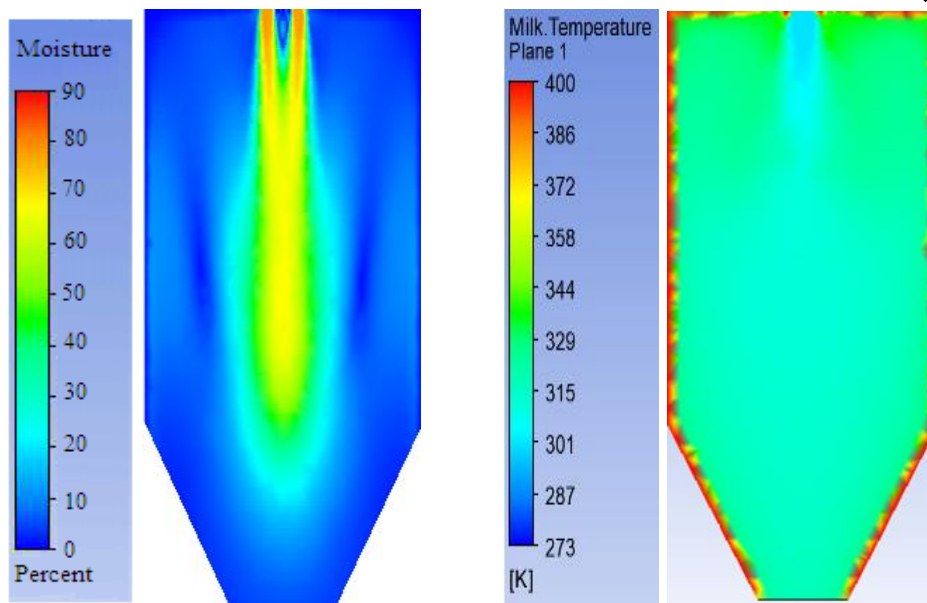
(ب) کانتور سرعت

و با ورود به ناحیه با دمای پایین‌تر، از سرعت آن کاسته شده و زمان بیشتری در معرض هوای گرم یکنواخت قرار می‌گیرد. از آنجایی که برای حفظ کیفیت پودر خشک‌شده و افزایش راندمان خشک‌کردن، سعی می‌شود 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 شبیه‌سازی این مهم حاصل شده است.

کانتور رطوبت ذرات در محفظه خشک‌کن در شکل ۶د 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.



(الف) کانتور فشار



د) کانتور رطوبت

ج) کانتور دما

شکل ۶. پارامترهای فرایندی داخل محفظه خشک‌کن برای محلول با قطر ذرات $50\ \mu\text{m}$

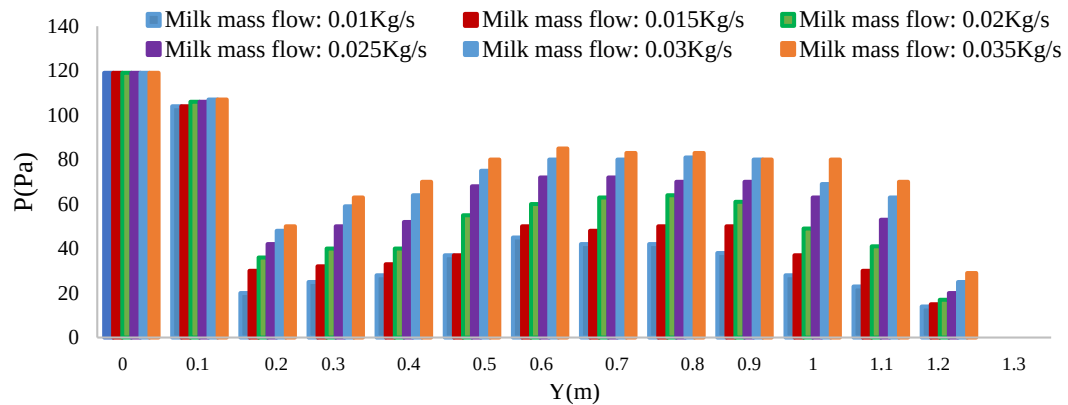
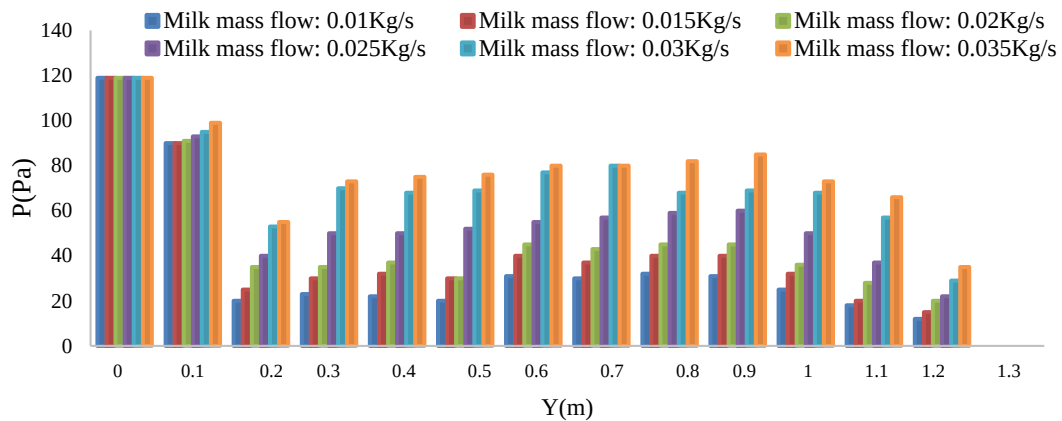
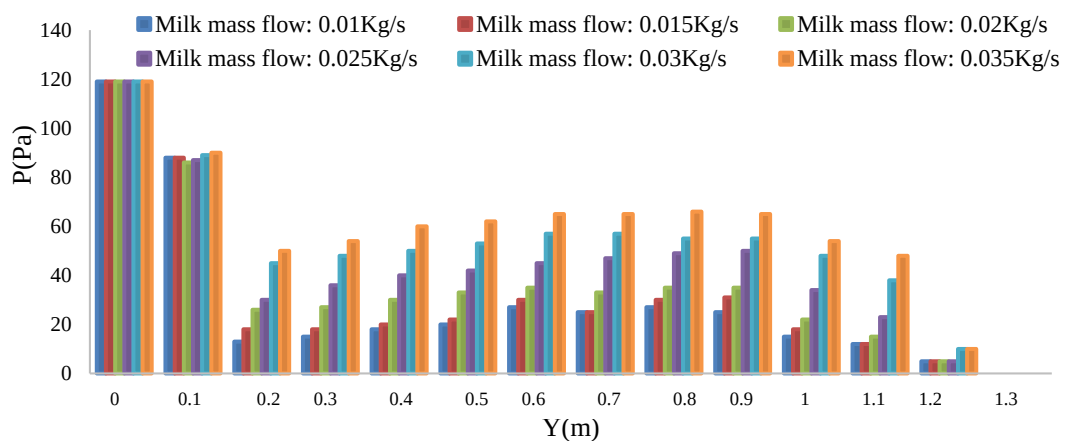
Fig 6. Process parameters inside the drying chamber for a solution with a particle diameter of $50\ \mu\text{m}$

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 کمتر شده و منجر به برخورد آنها و افزایش نیروی برهم‌کنش ذرات می‌شود و هرچه نیروی برهم‌کنش ذرات بیشتر باشد، فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد.

در یک دبی جرمی ثابت، با افزایش قطر ذرات شیر از $50\ \mu\text{m}$ به $150\ \mu\text{m}$ ، فشار داخل محفظه کاهش یافته است. بیشترین میزان کاهش فشار ۳۶٪ بوده است. این رخداد به این صورت قابل تفسیر است که ثابت بودن 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 کاهش فشار داخل محفظه شده است.

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. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار ورودی شیر به محفظه $190\ \text{Pa}$ 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 ۱ m، فشار متعادل شده و حالت یکنواخت‌تری 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 $0.1\ \text{kg/s}$ به $0.35\ \text{kg/s}$ ، فشار داخل محفظه افزایش یافته است. بیشترین میزان افزایش فشار ۶۵٪ بوده است. دلیل این پدیده آن است که افزایش دبی جرمی محلول و ثابت ماندن

a. Particle size: 50 μ mb. Particle size: 100 μ mc. Particle size: 150 μ m

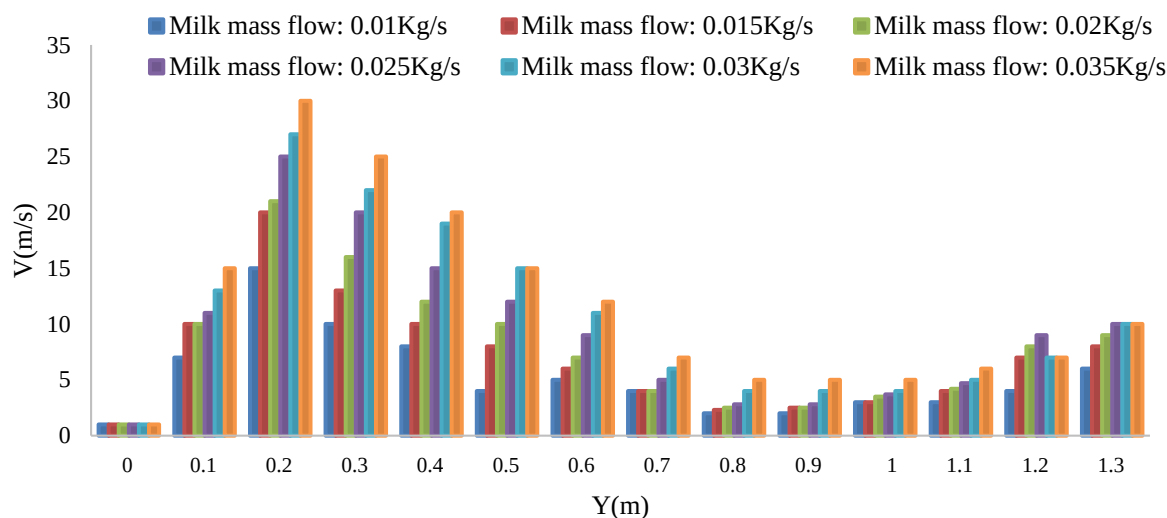
شکل ۷. فشار داخل محفظه خشک‌کن در امتداد محور عمودی

Fig 7. Pressure inside the drying chamber along the vertical axis

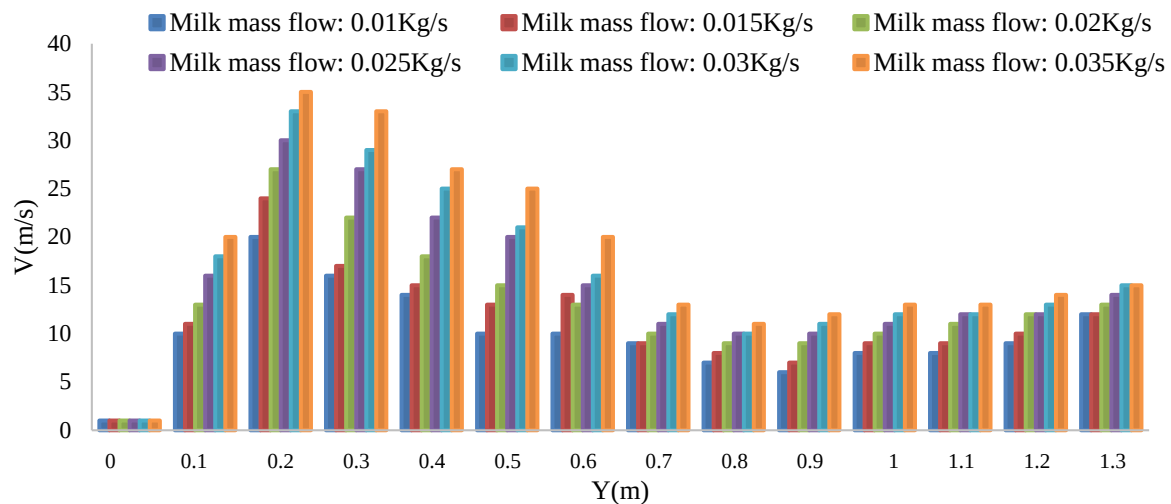
در یک مقدار دبی ثابت شیر، با افزایش قطر ذرات از $50\ \mu\text{m}$ به $150\ \mu\text{m}$ ، سرعت ذرات افزایش یافته است. با افزایش قطر ذرات، بر نیروی وزن ذره افزوده شده و فشار حرکتی قوی‌تری ایجاد می‌کند. این فشار حرکتی منجر به افزایش سرعت شده است. این افزایش سرعت به معنی این است که ذرات، زمان کمتری در داخل محفظه معلق هستند و هرچه زمان معلق ماندن ذرات در داخل محفظه کمتر باشد، رطوبت ذرات خروجی افزایش می‌یابد که با نتایج به‌دست‌آمده از سایر محققان [۲۵] مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد که کمترین سرعت لحظه‌ای ذرات برابر $2\ \text{m/s}$ و مربوط به اندازه ذره $50\ \mu\text{m}$ و دبی جرمی kg/s 0.01 است که در ارتفاع $80\ \text{cm}$ رخ داده است. همچنین بیشترین سرعت لحظه‌ای ذرات برابر $35\ \text{m/s}$ و مربوط به اندازه ذره $150\ \mu\text{m}$ و دبی جرمی kg/s 0.035 است که در ارتفاع $20\ \text{cm}$ اتفاق افتاده 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 دمیده شده، سرعت آنها افزایش یافته و در فواصل 20 تا $30\ \text{cm}$ 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 به دلیل کیفی شکل بودن محفظه و کوچک شدن دهانه خروجی، حالت ونوری اتفاق افتاده و سرعت ذرات افزایش یافته است.

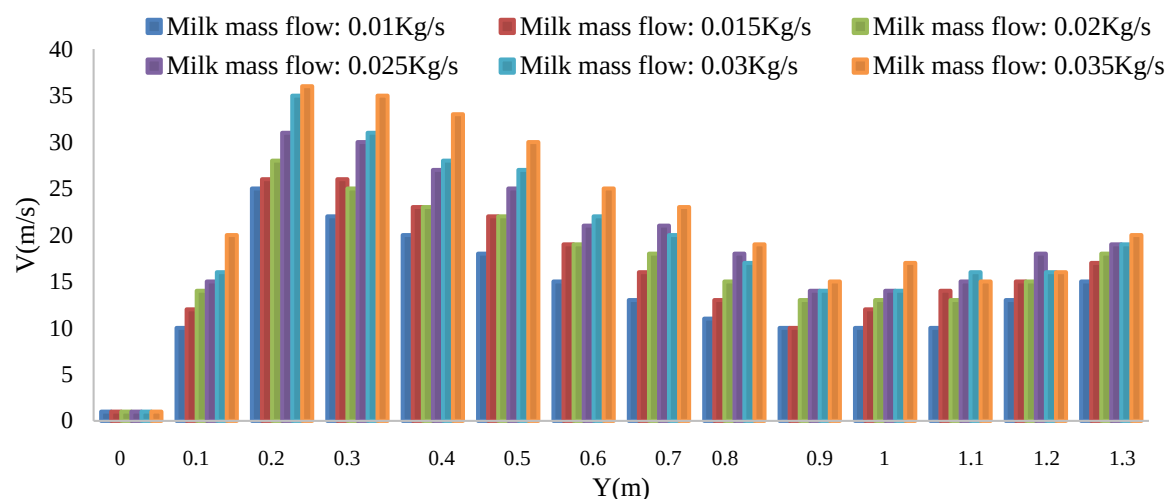
در یک اندازه ذره ثابت، با افزایش دبی جرمی شیر از kg/s 0.01 به kg/s 0.035 ، سرعت ذرات افزایش یافته است. باتوجه به این که ابعاد روزنه ورودی محلول در طول شبیه‌سازی ثابت فرض شده است، بر اساس رابطه $Q = A \cdot V$ ، افزایش دبی ورودی منجر به افزایش سرعت ذرات شده است. این افزایش سرعت در بیشترین مقدار، $15/5\%$ بود.



a. Particle size: $50\ \mu\text{m}$



b. Particle size: 100µm



c. Particle size: 150µm

شکل ۸. سرعت داخل محفظه خشک‌کن در امتداد محور عمودی

Fig 8. Velocity inside the drying chamber along the vertical axis

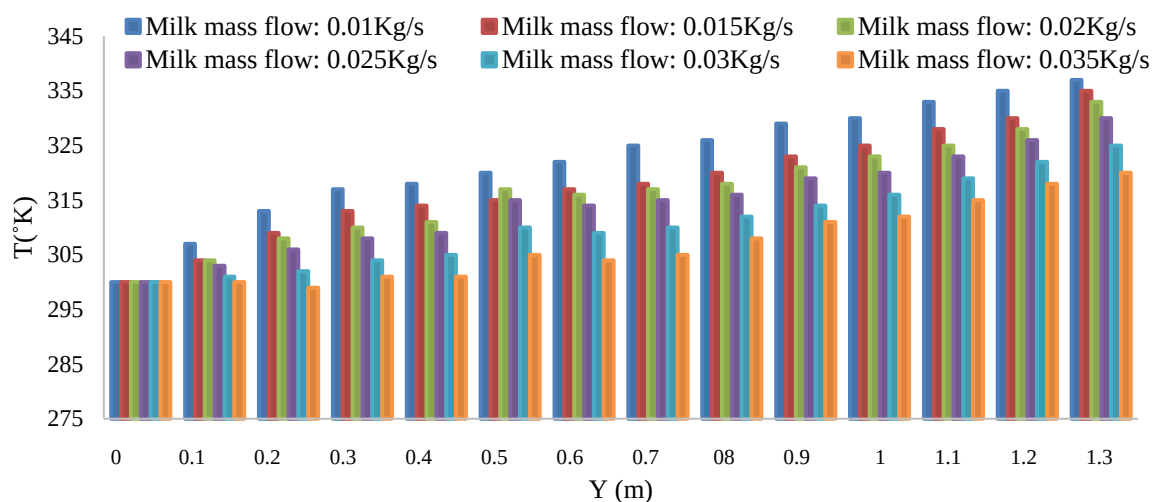
داخل محفظه و دمای ذرات کاهش پیدا کرده‌اند. افزایش دبی از 0.01 kg/s به 0.035 kg/s ، منجر به کاهش دمای ذرات خروجی به اندازه ۵٪ شده است. به وضوح قابل درک است که در صورت ثابت بودن دمای هوای ورودی، با افزایش دبی محلول، مقدار رطوبت بیشتری وارد محفظه شده که برای حذف آن انتقال جرم و انتقال حرارت بیشتری انجام می‌گیرد و در نهایت دمای کلی محفظه و ذرات کاهش می‌یابد. در تحقیق انجام‌شده توسط جورج و همکاران [۲۲]، تحلیل مشابهی برای انتقال حرارت گزارش شده است.

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، به نحوی که بیشترین دما در قسمت خروجی حاصل شده است.

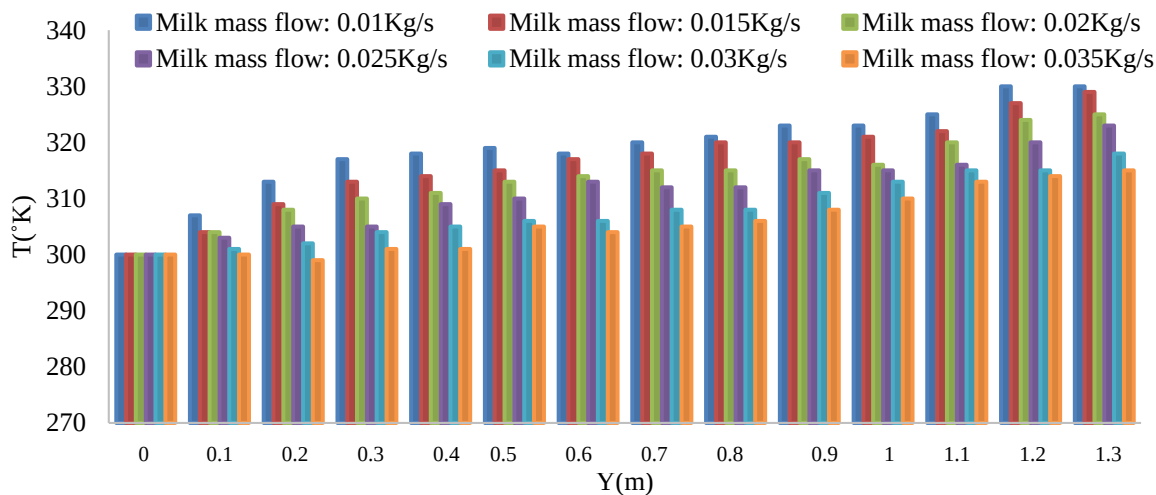
بررسی دمای ذرات در دبی‌های جرمی مختلف حاکی این واقعیت است که با افزایش دبی جرمی محلول ورودی، دمای

دبی مشخص، هرچه اندازه ذرات کوچک‌تر باشد، سطح تماس بین هوای گرم و ذرات بیشتر است که منجر به انتقال حرارت بهتر به ذرات و انتقال رطوبت بیشتر از ذرات می‌شود.

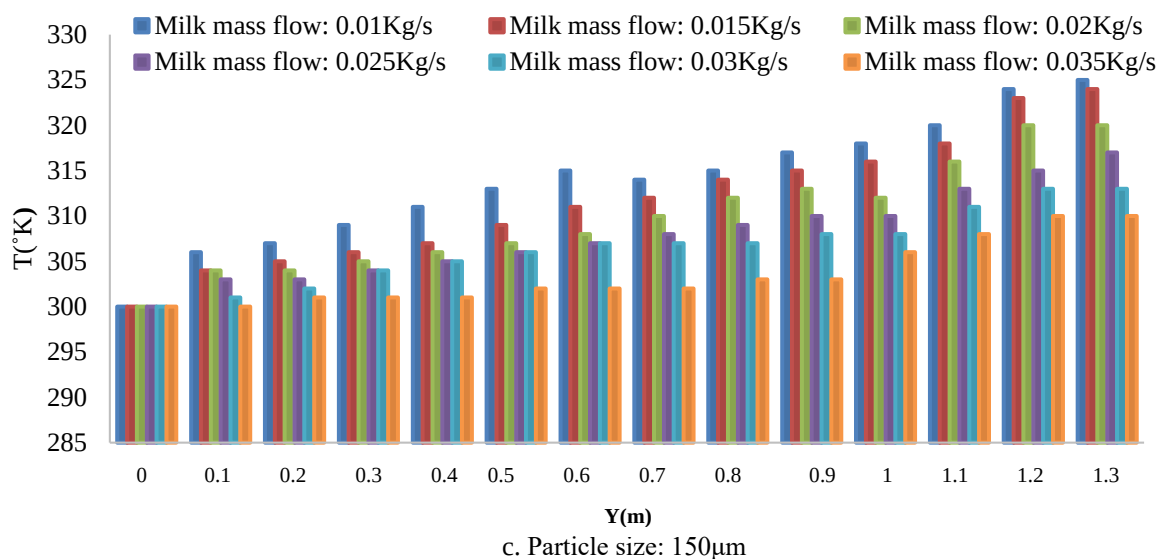
مقایسه بین سه نمودار در یک دبی جرمی مشخص نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات از $50\ \mu\text{m}$ به $150\ \mu\text{m}$ دمای ذرات خشک‌شده کاهش یافته است به گونه‌ای که دمای ذرات خشک‌شده در قسمت خروجی ۳٪ کاهش داشته است. در یک



a. Particle size: 50μm



b. Particle size: 100μm



شکل ۹. دمای داخل محفظه خشک‌کن در امتداد محور عمودی

Fig 9. Temperature inside the drying chamber along the vertical axis

۵. نتیجه‌گیری

افزایش دبی جرمی محلول ورودی و افزایش اندازه ذرات، دمای داخل محفظه و دمای ذرات خروجی را کاهش داده‌اند. افزایش دبی از 0.01 kg/s به 0.035 kg/s ، منجر به کاهش دمای ذرات خروجی به اندازه ۵٪ و افزایش اندازه ذرات از $50 \mu\text{m}$ به $150 \mu\text{m}$ ، منجر به کاهش دمای ذرات خروجی به اندازه ۳٪ شده است.

بررسی نتایج شبیه‌سازی 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.

در این تحقیق اثر دبی و اندازه ذرات محلول ورودی روی فشار، سرعت، دما و رطوبت داخل محفظه خشک‌کن پاششی به روش CFD بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد: با افزایش قطر ذرات شیر از $50 \mu\text{m}$ به $150 \mu\text{m}$ ، فشار داخل محفظه کاهش و با افزایش دبی جرمی شیر از 0.01 kg/s به 0.035 kg/s ، فشار داخل 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 منجر به افزایش سرعت ذرات شده است. افزایش دبی جرمی و افزایش قطر ذرات به ترتیب از 0.01 kg/s و $50 \mu\text{m}$ به 0.035 kg/s و $150 \mu\text{m}$ ، منجر به افزایش سرعت به میزان ۶۶٪ گردید.

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.2024.107863>.
- [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.apr.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 Jäger, F., Heinrich, S. (2022). CFD-aided population balance modeling of a spray drying process. *Adv. Powder Technol.* 33. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.103636>.



- [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.2022.107664>.
- [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/laite:2005024>.
- [22] Jamaledine 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, I.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/laite: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.2019.118837>.
- [30] Rogers, S. (2011). Developing and utilizing a mini food powder production 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>.