

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی خشک‌کن بستر شناور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

اسماعیل عابدی^۱ و حسن غفوری^{۲*}

چکیده

خشک‌کن‌ها نقش بسیار زیادی در فرآوری محصولات غذایی، شیمیایی و دارویی ایفا می‌کنند. عملکرد خشک کردن به عوامل مختلفی مانند نوع خشک‌کن، دما و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن، اندازه و میزان مواد ورودی و زمان ماند مواد در محفظه بستگی دارد. به همین دلیل لازم است تا مطالعات اختصاصی در زمینه خشک کردن محصولات صورت پذیرد. از طرفی طراحی، ساخت و تجهیز خشک‌کن به حسگرها، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف، فرایندی هزینه‌بر است و در تحقیقات اخیر از روش‌های عددی و شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل خشک‌کن‌ها استفاده شده است. لذا در این مقاله ویژگی‌های مؤثر بر فرآیند خشک کردن در یک خشک‌کن بستر شناور با جریان متقاطع با سینی، به روش CFD مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور اثر دبی جرمی مواد در ۳ سطح ۲/۷۶، ۵/۷۶ و ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت، سرعت هوای گرم ورودی در ۴ سطح ۲/۵، ۳، ۴ و ۵ متر بر ثانیه و دماهای هوای گرم در ۴ سطح ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس روی سرعت و فشار داخل محفظه، توسط نرم‌افزار ANSYS fluent 18 بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزایش دما باعث افزایش فشار و سرعت هوا در داخل محفظه و در بستر شد. افزایش هم‌چنین دبی خوراک، باعث کاهش فشار و سرعت گردید.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن بستر شناور، شبیه‌سازی، جریان متقاطع، CFD.

ارجاع: عابدی ا. و غفوری ح. ۱۴۰۳. شبیه‌سازی خشک‌کن بستر شناور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD). نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۳: ۱۳-۲۲. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14697.696>

۱- مربی گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان، اصفهان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: hasangh28@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

مقدمه

امروزه برای افزایش سرعت خشک شدن محصولات غذایی، دارویی، کشاورزی و غیره از خشک‌کن‌ها استفاده می‌شود. میزان مصرف انرژی و همچنین زمان خشک شدن محصولات بسته به نوع خشک‌کن متفاوت است. از بین خشک‌کن‌های موجود، نوعی از خشک‌کن‌ها طی فرآیند خشک کردن، ذرات را شناور می‌کنند. یکی از این نمونه خشک‌کن‌ها، خشک‌کن بستر شناور است.

در خشک‌کن‌های بستر شناور، دانه‌ها در اثر فشار هوای ورودی بالاتر از بستر ثابت خود قرار می‌گیرند و تبادل رطوبتی بهتری را با هوای پیرامون خود انجام می‌دهند. بنابراین دانه‌ها با آهنگی سریع و یکنواخت در مدت زمانی اندک خشک می‌شوند. ضخامت بستر در این خشک‌کن‌ها معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر است. خشک‌کن‌های بستر شناور به دو صورت پیمانه‌ای و جریان پیوسته وجود دارند. غالباً در خشک کردن محصولات غذایی به صورت بستر شناور، برای ورود هوای گرم به محفظه دانه‌ها، از روزه‌های صفحه فلزی مشبک استفاده می‌شود. هوای گرم از قسمت زیرین صفحه مشبک وارد توده محصول شده و پس از شناور ساختن و برهم زدن آن به همراه رطوبت از قسمت بالای محفظه خارج می‌شود.

در تحقیقی به منظور بررسی فرآیند خشک شدن ذرات بیضوی شکل از خشک‌کن بستر شناور استفاده شده است. این تحقیق به صورت شبیه‌سازی و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از ذرات بیضوی شکل در خشک‌کن باعث دیر خشک شدن ذرات و تجمع ذرات در مسیر شده است (Jin et al., 2024). بررسی خشک کردن مواد کروی مرطوب در خشک‌کن بستر شناور به روش CFD و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی نشان داد افزایش ارتفاع بستر مواد مرطوب منجر به کاهش انتقال حرارت و انتقال رطوبت بین مواد مرطوب و هوای در جریان شده است (Ma et al., 2023). بررسی رفتار خشک کردن فلفل در خشک‌کن بستر سیال چرخان^۲ (S-FBD) مجهز به مولد حرکت چرخشی نواری نشان داد که این نوع خشک‌کن می‌تواند میزان رطوبت

فلفل‌ها را با سرعت بیشتری نسبت به خشک‌کن بستر سیال معمولی^۳ (FBD) کاهش دهد (Chu wattanakul & Eiamsa-ard, 2019). نتایج مطالعه مدل سینتیکی خشک کردن برنج با ظرفیت‌های مختلف در خشک‌کن بستر شناور چرخشی، حاکی از آن است که ظرفیت در طول خشک کردن به طور قابل توجهی بر رفتار خشک کردن شالی با استفاده از خشک‌کن S-FBD تأثیر داشته است (Sitorus et al., 2021). تحقیق دیگری نشان داد که فرآیند خشک کردن در صنایع، به دلیل بازدهی پایین این فرآیند، مستلزم مصرف توان بالایی است و بهینه‌سازی آنها و طراحی خشک‌کن‌های کارآمدتر ضروری است. لذا به همین منظور یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی دما و رطوبت جامد و همچنین دما و رطوبت هوای خروجی پیشنهاد شد و با نتایج تجربی یک خشک‌کن نیمه صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد طراحی جدید می‌تواند رطوبت مواد جامد را تا ۵۰ درصد بیشتر از روش‌های مرسوم کاهش دهد (Zoghi et al., 2017). همچنین در تحقیقی از شبیه‌سازی عددی برای بررسی فرآیند جریان دو حالتی گاز-جامد ذرات درشت در نرخ‌های جریان جرم ورودی مختلف استفاده شد و نتایج این تحقیق با استفاده از روش تجربی عکس‌برداری با سرعت بالا تأیید شد (Zhou et al., 2022). در پژوهش دیگری اثر توزیع‌کننده‌های هوای مخروطی بر خشک کردن دانه‌های فلفل در خشک‌کن بستر شناور به صورت تجربی بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش سرعت هوا باعث تسریع فرآیند خشک شدن شده است (Chu wattanakul et al., 2022). در تحقیقی استفاده هم‌زمان از یک خشک‌کن بستر شناور و گرمایش پرتوی مادون قرمز (IR) برای خشک کردن دانه‌های گرده زنبور عسل بررسی شده است. نتایج نشان داد استفاده هم‌زمان تابش پرتوی مادون قرمز و شناور سازی بستر خشک‌کن، اثر هم‌افزایی برای فراوری دانه‌های گرده زنبور عسل داشت (Borel et al., 2020). برخی از محققین از روش شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی ویژگی‌های خشک‌کن و تحلیل انرژی استفاده کردند (Perazzini et al., 2020). شکل هندسی خشک‌کن نیز موضوع تحقیق پژوهش‌گران بوده است. نتایج تحقیقی در این زمینه که با رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد و با استفاده از

1- Computational Fluid Dynamics

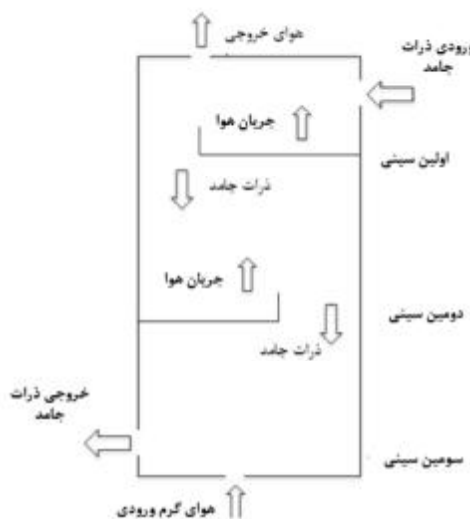
2- Swirling Fluidized Bed Dryer

3- Fluidized Bed Dryer

لذا هدف از این تحقیق، بررسی ویژگی‌های مؤثر بر فرآیند خشک کردن در خشک‌کن بستر شناور و به دست آوردن بهترین شرایط برای عملکرد آن است. برای این منظور اثر دما و سرعت هوای ورودی و سرعت ورود خوراک بر روی افت فشار و سرعت چرخش هوا در داخل خشک‌کن بستر شناور به روش CFD بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی خشک‌کن بستر شناور به روش CFD و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS fluent 18 انجام شد. طرح‌واره خشک‌کن مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است. برای این منظور، ابتدا هندسه خشک‌کن به صورت دو بعدی و بر اساس ابعاد موجود در جدول ۱، در قسمت New design modeler نرم‌افزار ترسیم گردید.



شکل ۱- طرح‌واره خشک‌کن بستر شناور مورد مطالعه (Zoghi et al., 2017)

جدول ۱- مشخصات هندسی خشک‌کن بستر شناور

ویژگی	اندازه
ارتفاع خشک‌کن	۱۶۰ سانتی‌متر
ارتفاع بستر	۱۰۰ سانتی‌متر
قطر دهانه‌ی ورودی خوراک	۳ سانتی‌متر
قطر دهانه‌ی ورودی هوا	۳ سانتی‌متر
قطر دهانه‌ی خروجی هوا	۳ سانتی‌متر
قطر دهانه‌ی خروجی محصول	۳ سانتی‌متر
قطر خشک‌کن	۴۰ سانتی‌متر

داده‌های تجربی به دست آمده از خشک‌کن راستی‌آزمایی شد، نشان داد سرعت تزریق هوا تأثیر قابل توجهی بر عملکرد خشک‌کن داشته است و پیکربندی مخروطی منجر به عملکرد بهتر شده است (Nabizadeh et al., 2020). نتایج ارزیابی بررسی اثرات ویژگی‌های هوای خشک‌کن بر میزان انتقال رطوبت نشان داد با افزایش دمای هوا، انتقال حرارت و حرکت رطوبت به سطح تسریع شده است و سرعت هوا نسبت به دمای هوا تأثیر کمتری بر فرآیند خشک کردن داشته است ولی برای سیال شدن مواد اهمیت بیش‌تری داشته است. افزایش دمای هوا، زمان رسیدن به وضعیت آشفته را کاهش داده است (Rosli et al., 2020). در مطالعه‌ی تجزیه و تحلیل خشک کردن زیست توده در یک خشک‌کن بستر شناور ارتعاشی که با استفاده از روش CFD انجام شده است از بخار فوق‌گرم به عنوان یکی از منابع تأمین انرژی برای خشک کردن استفاده شده است (Mohseni et al., 2019). تحقیق تجربی روی دو خشک‌کن برنج بستر شناور مخروطی با زوایای مخروطی ۵ درجه و ۱۰ درجه، که به منظور حفظ کیفیت و قابلیت نگهداری برنج انجام شد، نشان داد که خشک‌کن بستر شناور مخروطی با زاویه مخروطی ۱۰ درجه، عملکرد بهتری نسبت به خشک‌کن دیگر داشته است (Das et al., 2020).

از بررسی تحقیقات گذشته مشخص می‌شود که خشک‌کن‌های بستر شناور دارای قابلیت بالایی برای خشک کردن انواع مختلف مواد هستند. خشک‌کن‌های بستر شناور دارای مزایای زیادی مانند سرعت بالای خشک کردن، نرخ انتقال جرم و دمای بالا به دلیل سطح تماس بالای بین مواد و هوای خشک‌کن، کارایی گرمایی بالاتر به دلیل سطح جریان کوچک‌تر، هزینه‌های نگهداری پایین و سهولت پایش است. از طرفی به دلیل برخورد محصول با هوای ورودی، فشار هوا دچار افت شدیدی می‌شود و برای تداوم فعالیت به توان بالایی نیاز است و این موضوع از جمله محدودیت‌های سیستم‌های خشک‌کن بستر شناور است. با توجه به کاربردهای بسیار زیاد و همچنین اهمیت اینگونه خشک‌کن‌ها شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدرولیکی این خشک‌کن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

همکاران (Zoghi et al., 2017)، دبی خوراک ورودی در سه سطح ۲/۷۶، ۵/۷۶ و ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شد.

سایر شرایط انتخاب شده برای حل مساله در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- شرایط کلی شبیه‌سازی	
شرایط	مقدار
نوع حل	پایا
گرانش	۹/۸- در جهت y
نوع روش حل	Phase coupled Simple
معادلات استفاده شده	پیوستگی، انرژی و لزجت

معادلاتی که در این شبیه‌سازی استفاده شدند شامل معادله پیوستگی (معادله (۱))، معادله مومنوم (معادله (۲))، معادله انرژی (معادله (۳)) و معادله لزجت به صورت k-ε (معادله‌های (۴) و (۵)) هستند.

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

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

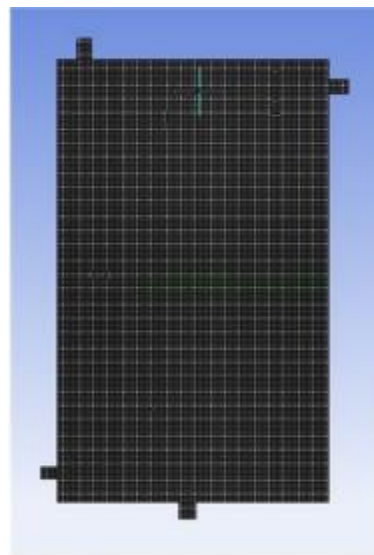
$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho H u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} (u_j \tau_{ij} + k \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

در معادلات ذکر شده p فشار برحسب پاسکال؛ ρ چگالی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب؛ w و v و u مؤلفه‌های سرعت برحسب متر بر ثانیه؛ g شتاب گرانش زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه؛ σ و μ لزجت برحسب مجذور متر بر ثانیه، G_k بیان‌گر تولید انرژی ناشی از

در گام بعدی، از شبکه مربعی برای شبکه‌بندی هندسه خشک‌کن استفاده شد (شکل ۲) و سپس استقلال نتایج از شبکه و کیفیت شبکه استفاده شده به روش ضرایب عمود^۱ و چولگی^۲ ارزیابی گردید.



شکل ۲- شبکه‌بندی خشک‌کن بستر شناور

مرحله سوم، انتخاب نوع ماده و رویکرد حل مساله است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان مواد و هوا از رویکرد دو حالتی^۳ اوپلر- اوپلر استفاده شد. به این منظور، مواد به صورت ذرات جداگانه در هوای دمیده شده به داخل خشک‌کن وارد و سپس شناور گردید. آخرین مرحله از تنظیمات نرم‌افزار، وارد کردن شرایط مساله است که از شرط سرعت در ورودی خشک‌کن و از شرط فشار در خروجی خشک‌کن استفاده شد. سرعت هوای ورودی به خشک‌کن در چهار سطح ۲/۵، ۳، ۴ و ۵ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی نیز در چهار سطح ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و فشار خروجی برابر صفر در نظر گرفته شد.

برای تعیین مقدار دبی خوراک ورودی باید توجه داشت که اگر دبی خوراک بیش‌تر از ظرفیت خشک‌کن باشد فرآیند خشک کردن به خوبی انجام نمی‌شود و اگر دبی خوراک بسیار کم باشد، خوراک دچار سوختگی می‌شود. لذا بر اساس مقادیر پیشنهادی در تحقیق ذوقی و

1- Orthogonal quality
2- Skewness
3- Two phase

$$(P_1 * V_1) / T_1 = (P_2 * V_2) / T_2 \quad (۶)$$

بر اساس معادله (۶) چنانچه دمای گاز افزایش یابد، فشار داخل محفظه نیز افزایش می‌یابد. همچنین تبخیر بیش‌تر در دمای بالاتر نیز منجر به این افزایش فشار گردیده است. با افزایش دمای هوای ورودی از ۵۰ به ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس، به ترتیب فشار متوسط هوای داخل محفظه به میزان ۴/۳، ۷/۶ و ۹/۸ درصد افزایش یافته است. این افزایش در نتایج مدل‌سازی ریاضی توسط Celen & Pektas, (2024) نیز گزارش شده است.

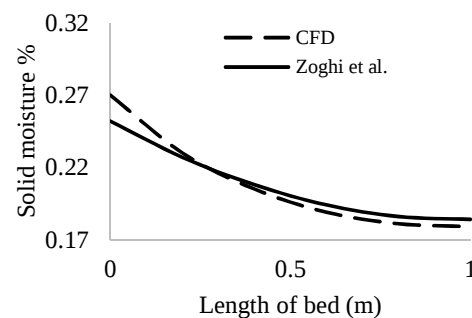
با افزایش دبی خوراک ورودی، فشار محفظه خشک‌کن کاهش یافته است. فشار داخل محفظه در دبی خوراک ۲/۷۶ کیلوگرم بر ساعت، در محدوده صفر تا ۱۲۰ پاسکال، در دبی خوراک ۵/۷۶ کیلوگرم بر ساعت، در محدوده صفر تا ۱۰۰ پاسکال و در دبی خوراک ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت، در محدوده صفر تا ۸۵ پاسکال است. نتایج نشان دهنده آن است که افزایش دبی خوراک ورودی از ۲/۷۶ کیلوگرم بر ساعت به ۵/۷۶ کیلوگرم بر ساعت منجر به کاهش فشار به میزان ۱۲/۲ درصد و افزایش دبی خوراک ورودی از ۲/۷۶ کیلوگرم بر ساعت به ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت منجر به کاهش فشار به میزان ۱۹/۱ درصد شده است. با افزایش دبی خوراک ورودی، برخورد بین مواد و هوای در حال عبور از داخل محفظه، افزایش یافته و این برخورد منجر به کاهش فشار داخل محفظه خشک‌کن شده است. نتایج تحقیق (Celen & Pektas, 2024) هم نشان داد که با افزایش جرم مواد تغذیه شده به خشک‌کن، افت فشار در محفظه خشک‌کن رخ داده است. فشار در سطح فوقانی سینی‌ها بیش‌تر از سایر نقاط داخل محفظه است. با توجه به اینکه حرکت مواد بر روی سینی به صورت یک بستر شناور است که با سطح سینی تماس دارد، فشار حاصل از وزن مواد بر روی سینی‌ها علاوه بر فشار هوا، بر سطح رویی سینی‌ها اعمال می‌گردد. سطح زیرین سینی‌ها نیز از فشار بالاتری نسبت به بقیه نقاط برخوردارند که دلیل آن برخورد مستقیم هوای گرم دمیده شده از قسمت پایین محفظه خشک‌کن به این نقاط است.

در نواحی نزدیک به محل اتصال سینی‌ها به بدنه‌ی خشک‌کن، یک ناحیه با فشار منفی ایجاد شده است. با توجه به حرکت هوا از کناره‌ی باز سینی‌ها، در محل اتصال سینی‌ها یک مکش ایجاد شده که منجر به فشار

گرادیان‌های سرعت متوسط جریان، G_b بیان‌گر تولید انرژی ناشی از بویانسی (برای جریان‌های بدون جاذبه و انتقال حرارت صفر است)، Y_M بیان‌گر تولید انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان (برای جریان‌های تراکم ناپذیر صفر است)، σ_{ek} و σ_e اعداد پرانتل متناسب با k و ε هستند، S_e و S_k هم شاخصه‌های چشمه قابل تعریف توسط کاربر هستند، در معادلات مدل مذکور ثابت C_μ و همچنین سایر ثابت‌ها براساس نتایج آزمایشگاهی متنوع و متعددی برای جریان‌های مختلف نظیر جریان در لایه مرزی، لایه‌های مختلط، جریان جت‌ها و غیره به‌دست آمده است. اگر چه این ثابت‌ها در دامنه وسیعی از کاربردها پاسخ‌های قابل قبولی می‌دهند اما در صورت نیاز می‌توان آن‌ها را تغییر داد.

نتایج و بحث

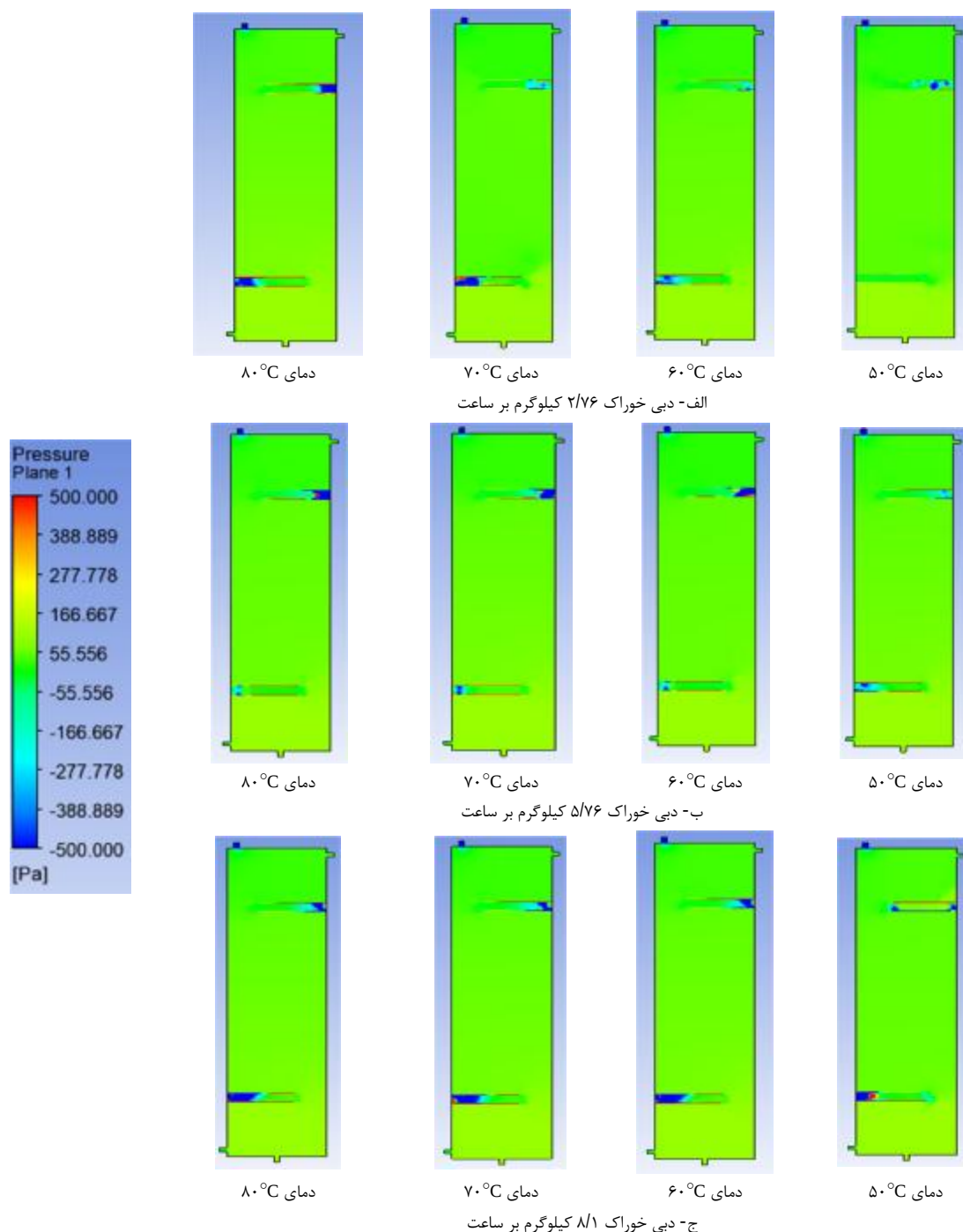
در تحقیق انجام شده توسط ذوقی و همکاران (Zoghi et al., 2017) رطوبت مواد جامد در فواصل مختلف یک خشک‌کن بستر شناور جریان متقاطع به صورت تجربی و مدل‌سازی بررسی شده است. لذا نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر با نتایج تحقیق ذوقی و همکاران (Zoghi et al., 2017) راستی آزمایی شد (شکل ۳). مقایسه نتایج شبیه‌سازی خطای کمتر از ۵٪ را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با تحقیق مرجع (Zoghi et al., 2017)

کانتور فشار درون محفظه خشک‌کن در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس در دبی خوراک ۲/۷۶، ۵/۷۶ و ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش دمای هوای ورودی، فشار محفظه خشک‌کن هم افزایش یافته است. این افزایش فشار با توجه به رابطه گازها (معادله (۶)) قابل توجیه است.

منفی در این ناحیه گردیده است. این فشار منفی تأثیری روی عمل خشک‌کردن مواد ندارد، ولی از نظر مقاومت سازه و نحوه اتصالات سینی به بدنه، باید مدنظر طراح قرار گیرد.



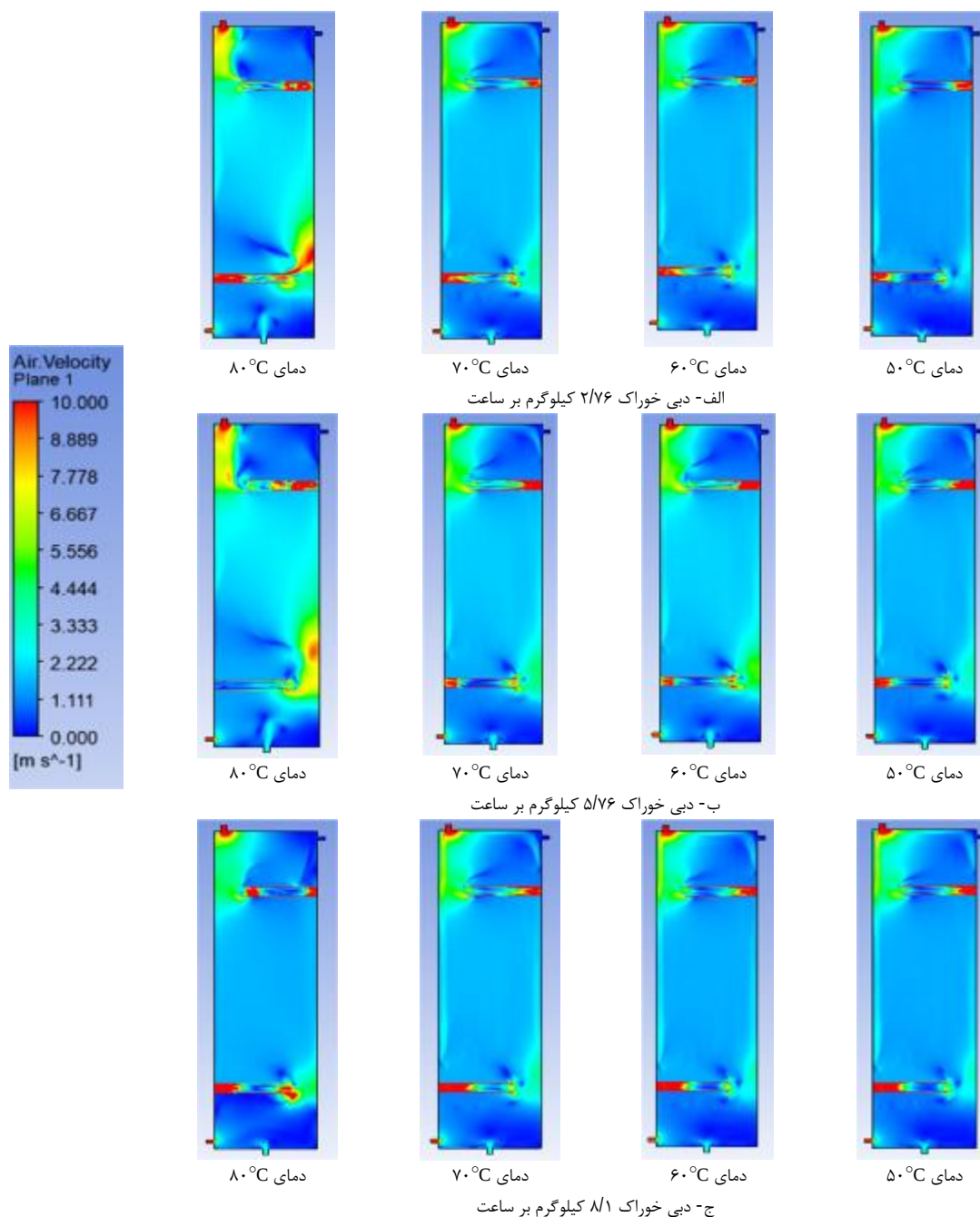
شکل ۴- کانتورهای فشار داخل محفظه در دماهای مختلف هوای ورودی و دبي‌های مختلف خوراك

سرعت هوا در محفظه خشک‌کن هم افزایش یافته است. این پدیده به این دلیل است که هر چه هوا گرم‌تر می‌شود، جنبش مولکولی نیز بیش‌تر شده و سرعت حرکت هوا بیش‌تر می‌شود. هوای عبوری از کنار سینی‌ها

کانتور سرعت هوای درون محفظه خشک‌کن در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس در دبي‌های خوراك ۲/۷۶، ۵/۷۶ و ۸/۱ كيلوگرم بر ساعت در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش دمای هوای ورودی،

سلسیوس، به ترتیب منجر به افزایش سرعت متوسط هوای داخل محفظه به میزان $۸/۳$ ، $۱۷/۶$ و $۲۶/۵$ درصد شده است. تحقیق انجام شده توسط بابلیس و بلسیوتیس (Babalıs & Belessiotis, 2004) نیز نشان داد که افزایش دمای هوای ورودی روی شاخصه‌های دینامیکی خشک‌کن، نظیر سرعت و فشار هوای داخل محفظه اثر معنی‌دار داشته است.

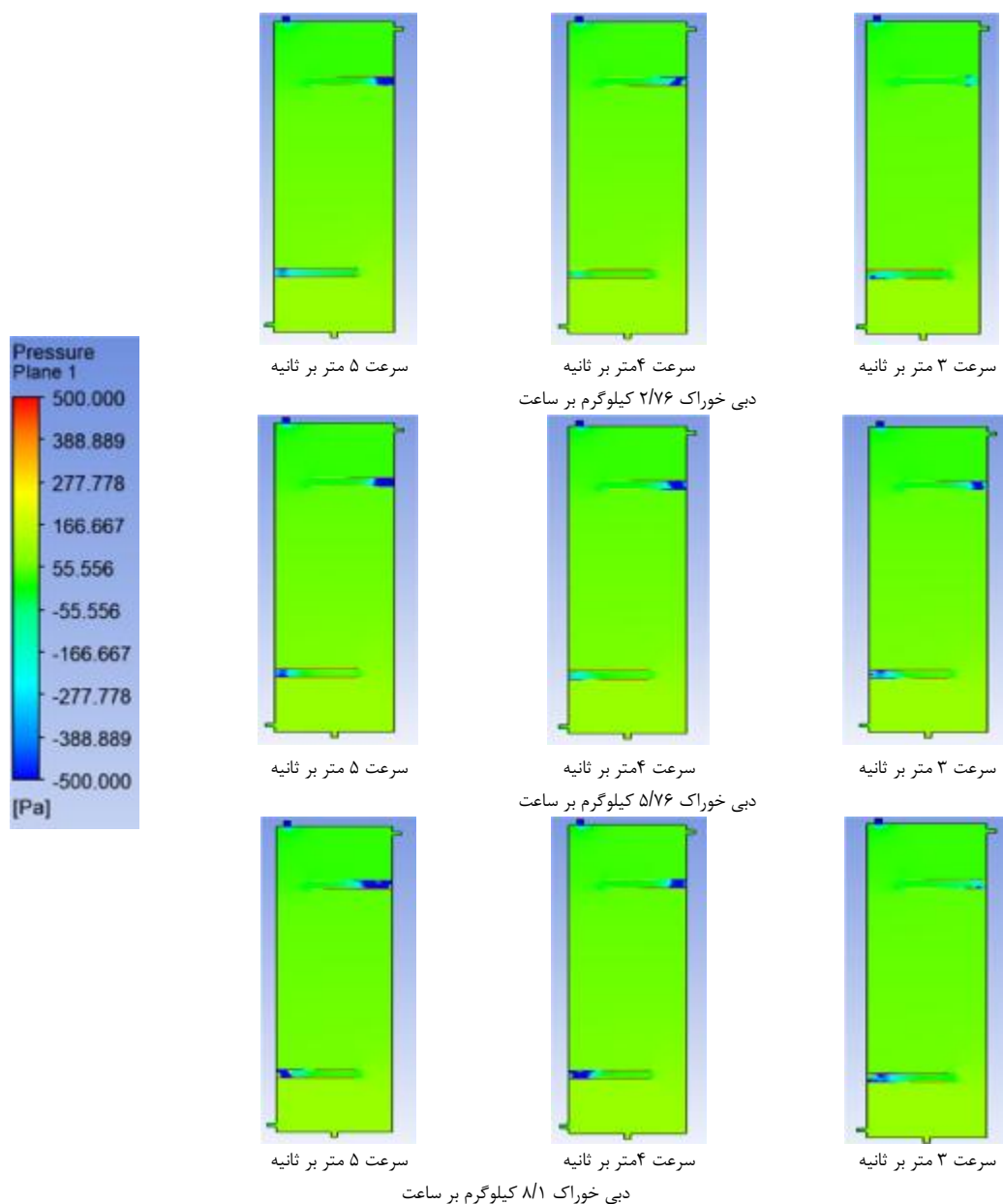
به دلیل عبور از سطح مقطع کوچک‌تر و ایجاد حالت ونتوری، سرعت بیش‌تری نسبت به نواحی داخلی محفظه داشته است. در نواحی نزدیک به محل اتصال سینی‌ها به بدنه خشک‌کن، سرعت هوا افزایش یافته است. همان‌طور که در کانتور فشار نشان داده شد، در این قسمت یک ناحیه مکشی ایجاد شده و این پدیده منجر به افزایش سرعت گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای هوای ورودی از ۵۰ به ۶۰ ، ۷۰ و ۸۰ درجه



شکل ۵- کانتورهای سرعت هوای داخل محفظه در دماهای مختلف هوای ورودی و دبی‌های مختلف خوراک

سرعت هوای ورودی به محفظه، فشار محفظه داخل خشک‌کن افزایش یافته است. با افزایش دبی خوراک ورودی، افت فشار در محفظه خشک‌کن اتفاق افتاده است. همچنان که قبلاً نیز بیان شد، برخورد بین مواد و هوای در حال عبور از داخل محفظه، به عنوان یک مانع در مسیر جریان ظاهر شده و منجر به افت فشار داخل محفظه خشک‌کن شده است. افزایش دبی خوراک ورودی از $2/76$ به $5/76$ و $8/1$ کیلوگرم بر ساعت، کاهش فشار به میزان $6/9$ و $14/7$ درصد را نشان می‌دهد.

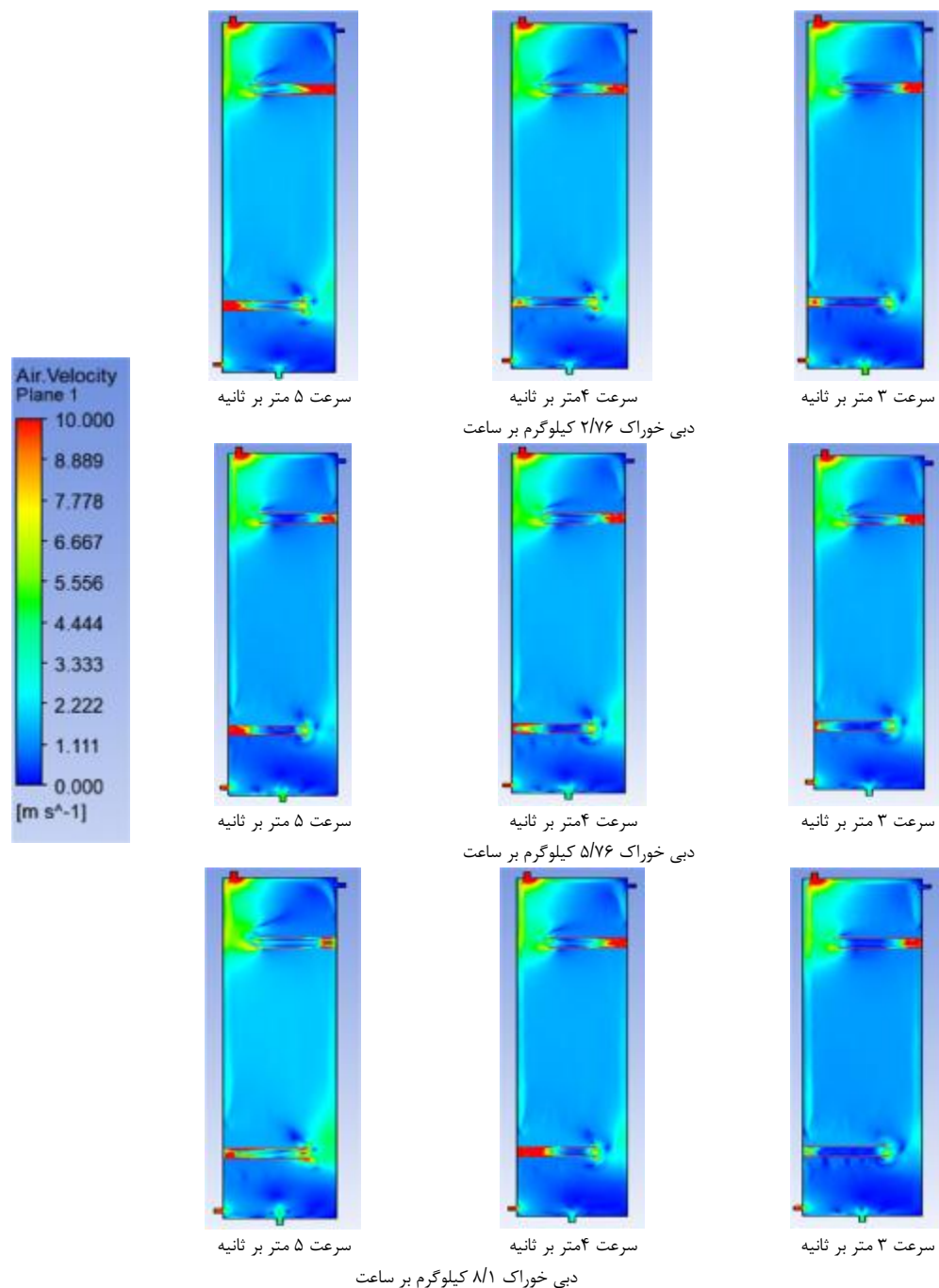
با افزایش سرعت هوای ورودی، فشار محفظه خشک‌کن هم افزایش یافته است. با افزایش سرعت هوای ورودی، حجم هوای بیش‌تری در واحد زمان وارد محفظه شده و این انبساط هوا، منجر به افزایش فشار محفظه داخل خشک‌کن شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت هوای ورودی از 3 به 4 و 5 متر بر ثانیه، به ترتیب منجر به افزایش فشار متوسط هوای داخل محفظه به میزان 6 و $11/1$ درصد شده است. گزارش‌های ارستین و اورالسان (Ercetin & Uralcan, 2009) و پارلاک (Parlak, 2014) هم نشان می‌دهد که با افزایش



شکل ۶- کانتورهای فشار محفظه در سرعت‌های مختلف هوای ورودی و دبی‌های مختلف خوراک

متوسط هوای داخل محفظه به میزان ۹/۱ و ۱۸/۷ درصد شده است. با افزایش دبی خوراک ورودی، سرعت هوا در محفظه خشک‌کن کاهش یافته که به دلیل برخورد بیشتر مواد به هوا بوده که نهایتاً سرعت هوای عبوری کم شده است. افزایش دبی خوراک ورودی از ۲/۷۶ به ۵/۷۶ و ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت، کاهش سرعت متوسط هوای داخل محفظه را به میزان ۶/۲ و ۱۳/۳ درصد نشان می‌دهد.

کانتور سرعت هوای درون محفظه خشک‌کن در سرعت هوای ورودی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متر بر ثانیه در دبی خوراک ۲/۷۶، ۵/۷۶ و ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت در شکل ۷ نشان قابل مشاهده است. با افزایش سرعت هوای ورودی، سرعت هوا در محفظه خشک‌کن هم افزایش یافته که امری طبیعی است. افزایش سرعت هوای ورودی از ۳ به ۴ و ۵ متر بر ثانیه، به ترتیب منجر به افزایش سرعت



شکل ۷- کانتورهای سرعت هوای داخل محفظه در سرعت‌های مختلف هوای ورودی و دبی‌های مختلف خوراک

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر دما و سرعت هوای ورودی و دبی جرمی خوراک روی سرعت و فشار داخل محفظه خشک‌کن بستر شناور به روش CFD بررسی گردید. نتایج مدل‌سازی نشان داد:

افزایش دمای هوای ورودی از ۵۰ درجه سلسیوس به ۸۰ درجه سلسیوس منجر به افزایش فشار و سرعت هوا در داخل محفظه به ترتیب ۹/۸ و ۲۶/۵ درصد شد.

افزایش دبی خوراک از ۲/۷۶ به ۸/۱ کیلوگرم بر ساعت باعث کاهش فشار و سرعت هوا به ترتیب به میزان ۱۴/۷ و ۱۷/۲ درصد در داخل محفظه گردید.

با افزایش سرعت هوای ورودی از ۳ به ۵ متر بر ثانیه، سرعت و فشار هوا در داخل محفظه خشک‌کن به ترتیب به میزان ۱۸/۷ و ۱۱/۱ درصد افزایش یافت.

منابع

- Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University, 22(3): 89–99.
- Jin, H., Wu, Q., Wang, S., & He, Y. (2024). Heat and mass transfer performance of non-spherical wet particles in a fluidized bed dryer. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121780.
- Ma, Z., Tu, Q., Liu, Z., Xu, Y., Ge, R., & Wang, H. (2023). CFD-DEM investigation of the gas-solid flow characteristics in a fluidized bed dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 196: 235-253.
- Mohseni, M., Kolomijschuk, A., Peters, B., & Demoulling, M. (2019). Biomass drying in a vibrating fluidized bed dryer with a Lagrangian-Eulerian approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 138: 219-234.
- Nabizadeh, A., Hassanzadeh, H., Asadieraghi, M., Hassanpour, A., Moradi, D., Keshavarz Moraveji, M., & Hozhabri Namin, M. (2020). A parametric study of the drying process of polypropylene particles in a pilot-scale fluidized bed dryer using Computational Fluid Dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, 156: 13-22.
- Parlak, N. (2014). Investigation of drying kinetics of ginger in a fluidized bed dryer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(2): 261–269.
- Perazzini, H., Perazzini, M. T. B., Meili, L., & Freire, F. B. (2020). Artificial neural networks to model kinetics and energy efficiency in fixed, fluidized and vibro-fluidized bed dryers towards process optimization. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 156: 108089.
- Rosli, M., Nasir, A. M. A., & Takriff, M. S. (2020). Drying sago pith waste in a fluidized bed dryer. *Food and Bioproducts Processing*, 123: 335-344.
- Sitorus, A., Novrinaldi, N., Putra, S. A., Cebro, I. S., & Bulan, R. (2021). Modelling drying kinetics of paddy in swirling fluidized bed dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28: 101572.
- Zoghi, T., Shahhoseinirogh, S., & Nosrati, K. (2017). New Design of Cross-flow Fluidized Bed Dryers. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(6): 1351-1360.
- Zhou, L., Lv, W., Bai, L., Han, Y., Wang, J., Shi, W., & Huang, G. (2022). CFD-DEM study of gas-solid flow characteristics in a fluidized bed with different diameter of coarse particles. *Energy Reports*, 8: 2376-2388.
- Babalis, S. J., & Belessiotis, V. G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65(3): 449-458.
- Borel, L. D. M. S., Marques, L. G., & Prado, M. M. (2020). Performance evaluation of an infrared heating-assisted fluidized bed dryer for processing bee-pollen grains. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 155: 108044.
- Celen, S., & Pektas, S. (2024). Optimization of Factors Affecting the Performance of a Fluidized Bed Dryer. *The Philippine Agricultural Scientist*, 107(1): 44-54.
- Chuwattanakul, V., & Eiamsa-ard, S. (2019). Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13: 100389.
- Chuwattanakul, V., Wongcharee, K., Pimsarn, M., Chokphoemphun, S., Chamoli, S., & Eiamsa-ard, S. (2022). Effect of conical air distributors on drying of peppercorns in a fluidized bed dryer: Prediction using an artificial neural network. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36(4): 102188.
- Das, H. J., Mahanta, P., Saikia, R., & Aamir, M. S. (2020). Performance Evaluation of drying characteristics in conical bubbling fluidized bed dryer. *Powder Technology*, 374: 534-543.
- Ercetin, U., & Uralcan, IY. (2009). Experimental analysis of the drying of parboiled wheat in fluidized bed. *Journal of*