

شبیه‌سازی عددی خشک کن پاششی با جت هوای فشرده

ابوالحسن صالحی^۱، امید رضا روستاپور^۲ و حمید رضا گازر^۳

۱- دانش آموخته ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق (hasan.salehi100@gmail.com)

۲- موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (o.roostapour@areo.ir)

۳- موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (hgazor@yahoo.com)

چکیده

در این تحقیق، مدل‌سازی جریان سیال در خشک کن پاششی در دو حالت به کارگیری و عدم به کارگیری جت هوا در بدنه مخروطی مخزن با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی در نرم‌افزار فلوئنت انجام شد. بر اساس نتایج، در شرایط بدون جت هوا، سرعت جریان هوا در بالای برج بیشترین مقدار را داشته و با ادامه جریان به سمت پایین و دور شدن از هسته مرکزی، کاهش می‌یابد. در شرایط وجود جت هوا، سرعت جریان در هسته مرکزی به شدت افزایش یافته و به سمت سقف خشک کن تغییر جهت می‌دهد. تغییرات سرعت شعاعی پس از تعریف جت هوای فشرده در ناحیه مرزی قسمت استوانه‌ای و مخروطی مخزن، نشانگر افزایش سطح سرعت می‌باشد. همچنین سرعت در ناحیه پایین مخزن نسبت به ابتدای آن بیشتر است زیرا ورود هوای با سرعت بالا توسط جت بدنه متعاقباً جریان هوا در خشک کن را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش سرعت نسبی هوا خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: خشک کن پاششی، الگوی جریان هوا، مدل‌سازی دینامیک سیال، جت هوا

نویسنده مسئول: o.roostapour@areo.ir

فهرست نمادها

واحد	نماد	شرح
mm	d	قطر سوراخ‌های ورودی هوا
mm	d_h	قطر هیدرولیکی
$W/m^2.K$	\bar{h}	ضریب جابجایی محلی
-	I	شدت اغتشاش
$W/m.K$	k	رسانش گرمایی (هدایت حرارتی)
m	L	ضخامت - ارتفاع قسمت استوانه‌ای
-	\bar{Nu}_l	عدد نوسلت متوسط
-	n	تعداد سوراخ‌های ورودی هوا
-	Re_{d_h}	عدد رینولدز با طول مشخصه قطر هیدرولیکی
mm	\bar{r}_i	شعاع متوسط هر حلقه
mm^2	S	مساحت حلقه‌ها
m/s	u'	نوسانات سرعت
m/s	$\bar{u}(u_{ave})$	سرعت جریان متوسط
m/s	V	سرعت هوای ورودی
kg/m.s	μ_a	ویسکوزیته هوا
kg/m ³	ρ	جرم حجمی سیال

شبیه‌سازی عددی خشک‌کن پاششی با جت هوای فشرده

مقدمه

یکی از مشکلات در خشک‌کن پاششی، تجمع و نشست ذرات بر جداره خشک‌کن خصوصاً جداره مخروطی است. نشست ذرات پودر بر جداره داخلی با به کار گرفتن تمهیداتی مانند استفاده از جاروبک‌های هوا و جمع‌آوری پودر صورت می‌پذیرد.

بررسی نشست ذرات پودر بر جداره خشک‌کن پاششی به روش دینامیک سیال محاسباتی^۱ و آزمایشگاهی، با تغییر تناوبی انرژی در سطح دیواره انجام گرفت. نتایج نشان داد که دیواره با انرژی پایین‌تر، دمای تبدیل شیشه‌ای ذرات را کاهش می‌دهد. در این راستا حالت بهینه عملیات برای داشتن دیواره با چسبندگی کمتر مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، دمای عملیات فاکتور مؤثری در چسبندگی ذرات است [۱۹].

الگوی جریان هوا در خشک‌کن پاششی در مقیاس صنعتی به روش دینامیک سیال محاسباتی و با استفاده از کد نرم‌افزاری CFX10 به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. جریان آشفته به روش SST و با استفاده از معادلات گذرای RANS حل شد. در این راستا الگوی جریان هسته مرکزی با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری توسط حسگرهای جریان راست آزمایی شد و یک توافق قابل قبول بین داده‌های مدل‌سازی و اندازه‌گیری شده به دست آمد [۳].

نتایج شبیه‌سازی عددی یک خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی نشان داد که سرعت کم جریان هوا باعث افزایش زمان ماندگاری ذرات در مخزن شده است. جریان طبیعی هوا سبب انحراف جریان از هسته مرکزی به نواحی اطراف دیواره با جریان پیچشی شده و لایه‌ای از جریان با سرعت بالا در ناحیه مجاور دیواره خشک‌کن تشکیل می‌دهد [۲۰].

تغییرات رطوبت ذرات نمک در خشک‌کن پاششی جریان هم‌سو با استفاده از روش دینامیک سیال شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، کاهش رطوبت در ناحیه هسته مرکزی شدیدتر و با دور شدن از این ناحیه به سمت جداره خشک‌کن تا حد ۲۰ درصد امتداد شعاعی، تغییرات رطوبت ثابت مانده است [۱۷].

تأثیر اندازه ذرات، جریان هوا ورودی و دمای هوا ورودی بر میزان تولید آتروپی در خشک‌کن پاششی جریان گذرا تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که قانون دوم ترمودینامیک یک ابزار بالقوه برای بهینه‌سازی عملیات خشک‌کردن و نشست ذرات پودر می‌باشد [۷].

جریان سیال درون خشک‌کن پاششی دوجداره به صورت تقارن محوری مدل‌سازی عددی شد. بر اساس نتایج، در اطراف هسته مرکزی گردابه‌هایی ایجاد می‌شود که باعث برگشت ذرات به طرف بالای برج خشک‌کن خواهد شد. در این خشک‌کن، جریان هوای خنک در جداره مخزن از انتهای ناحیه مخروطی وارد می‌شود و به‌طور کاملاً لایه‌ای به مسیر خود ادامه می‌دهد تا این که از بالای برج خشک‌کن خارج شود. جریان هوای خنک باعث کاهش نشست ذرات بر دیواره مخزن شده است [۱۶].

نشست ذرات بر روی دیواره‌ها یک مشکل اساسی در خشک‌کن‌های پاششی است که به‌طور غیرمستقیم بر کیفیت پودر تولیدی تأثیر می‌گذارد. عوامل متعددی از جمله درجه حرارت دیواره، اندازه خشک‌کن و خواص دیواره می‌تواند بر نشست ذرات و هدر رفت انرژی تأثیرگذار باشد [۸].

یک مدل پویای محاسباتی در خشک‌کن‌های پاششی بر اساس معادلات جرم و گرما در فازهای قطرات مایع و ذرات جامد توسعه یافت و برای شبیه‌سازی و تحلیل اثر به کارگیری مالتودکسترین به عنوان ماده کمکی خشک‌کردن بر روی الگوی جریان سیال در خشک‌کن و درصد رسوب ذرات آنتوسیانین با توجه به دمای انتقال شیشه به کار گرفته شد. استفاده از مالتودکسترین باعث افزایش دمای انتقال شیشه‌ای ذرات و کاهش نشست آن‌ها بر دیواره می‌شود [۱۴].

شرایط عملیاتی یک نازل دوسیال بر اندازه متوسط قطر قطرات مورد بررسی قرار گرفت و شرایط مناسب برای پیش‌بینی میانگین قطر قطرات در جلوگیری از نشست آن‌ها بر جداره مخزن خشک‌کن بررسی شد. چندین داده تجربی از جمله اندازه قطرات در خشک‌کن پاششی مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا، مدل معتبر برای ارزیابی اثر متغیرهای فرایند اصلی بر خواص نهایی محصول مانند اندازه و چگالی ذرات و رطوبت پودر در جلوگیری از نشست ذرات بر بدنه، ارائه شد [۲].

در این تحقیق با تعریف جت هوای فشرده در بدنه خشک‌کن، نسبت به مدل‌سازی عددی و بررسی کاهش نشست ذرات پودر بر ناحیه مخروطی جداره اقدام شد.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی جریان در خشک‌کن پاششی

الگوی جریان هوا در خشک‌کن پاششی نیمه‌صنعتی به حجم ۵/۶ مترمکعب به روش دینامیک سیال جریان شبیه‌سازی شد. در این راستا، ذرات به‌عنوان فاز گسسته تعریف شد و زمان ماندگاری و اندازه حرکت مورد بررسی قرار گرفت.

تولید مدل هندسی و ساخت شبکه

هندسه خشک‌کن و هندسه جداره خنک‌کننده با توجه به تقارن موجود به صورت چند محوری مدل‌سازی شد. برای توزیع هوای گرم در محفظه خشک‌کن از یک صفحه توزیع‌کننده گرد با سه ردیف سوراخ به قطر ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. بطوری که تعداد کل سوراخ‌ها ۴۲ عدد بوده و ردیف‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۶، ۱۶، و ۲۰ سوراخ دارند. برای مدل‌سازی صفحه توزیع هوا به صورت تقارن محوری، این صفحه با سه ردیف حلقه با سه قطر هیدرولیکی متقارن تعریف شد به صورتی که دبی هوای عبوری از آن‌ها معادل دبی هوای عبوری از سوراخ‌ها باشد. شرط مرزی ورودی در این ناحیه، دبی جرمی^۱ در نظر گرفته شده است. برای اعمال این شرط مرزی برای ۳ حلقه ورودی هوا، لازم است که دبی جرمی هوای عبوری از هر حلقه، دمای هوای ورودی، جهت بردارهای سرعت هوای ورودی، شدت آشفته‌گی و قطر هیدرولیکی حلقه معرفی شوند. مساحت کل سوراخ‌ها از رابطه ۱ و مساحت کل حلقه‌ها از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$S = \sum 2\pi r_i d_{h_i} \quad (1)$$

$$S = \frac{n\pi d^2}{4} \quad (2)$$

با مساوی قرار دادن روابط فوق، قطر هیدرولیکی حلقه‌ها (d_{h_i}) محاسبه شد که ۱۴/۵۸ میلی‌متر به دست آمد. با دستیابی به قطر هیدرولیکی می‌توان مساحت هر حلقه را محاسبه کرد.

هندسه تقارن چند محوری محفظه خشک‌کن و جداره هوای خنک توسط شبکه با ساختار مشخص بلوکی شامل سلول‌های چهارضلعی مدل شد. جدول ۱ تعداد سلول‌های سه شبکه تولید شده در خشک‌کن جهت استقلال جواب از شبکه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تعداد سلول‌های تولیدی جهت بررسی استقلال از شبکه

۶۴۵۶۰	۵۷۴۴۹	۵۳۱۹۲	تعداد سلول‌های تولید شده
-------	-------	-------	--------------------------

در تعیین کیفیت همگرایی حل، مجموع قدرمطلق مقادیر باقی مانده جرمی تمام سلول‌های شبکه تقریباً مساوی کل دبی جریان هوای ورودی به محفظه‌ها بوده است. انتخاب شبکه و ریز بودن آن در ارائه جواب مطمئن با حداقل خطا بسیار مهم می‌باشد. برای بررسی استقلال میدان حل از شبکه انتخاب شده، مقایسه مقادیر سرعت محوری، شعاعی و یا مقادیر k و ϵ برای شبکه‌های مختلف انجام می‌شود [۹]. شبکه‌های ساخته شده، هر یک به‌طور مستقل اما با روش مشابه در نرم‌افزار گمبیت^۱ تولید و در نرم‌افزار فلوئنت^۲ تحلیل شده است. برای انتخاب بهترین شبکه باید نسبت به استقلال جواب‌ها از شبکه اطمینان حاصل شود. برای این منظور جریان در هر سه شبکه مدل‌سازی و تغییرات سرعت در مقاطع مختلف خشک کن بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، شبکه با ۵۷۴۴۹ سلول دارای درصد تغییرات کمتر از ۵ درصد نسبت به شبکه با ۶۴۵۶۰ سلول را داشت لذا به‌عنوان شبکه بهینه مورد استفاده قرار گرفت.

آشفته‌گی و معادلات حاکم بر جریان سیال

برای مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی آشفته‌گی جریان در خشک کن پاششی، مدل $k-\epsilon$ استاندارد مناسب می‌باشد [۵ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۸ و ۲۰]. این مدل شامل دو معادله حاکم برای تشریح آشفته‌گی جریان بوده و برای بیان انتقال خواص آشفته‌گی جریان شامل انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ استهلاك انرژی (ϵ) ارائه شده است. برای حل جریان آشفته با فرض تراکم‌ناپذیر بودن جریان و عدم اثر متقابل فاز گسسته بر فاز پیوسته هوا (دبی جرمی قطرات کمتر از ۵ درصد دبی جرمی هوا است)، از حل کننده گسسته^۳ استفاده شد. فرمول‌بندی به صورت مبهم^۴ در نظر گرفته و با تعریف سرعت‌ها به صورت مطلق، مسئله جهت حل آماده شد. مدل به صورت تقارن محوری و از نظر زمانی به صورت پایدار فرض و معادلات تا دستیابی به دقت 10^{-1} حل شد.

شرایط مرزی محفظه خشک کن و جداره خشک کننده

در مدل تقارن چند محوری کلیه شرایط مرزی جداره‌های داخلی و خارجی دیواره^۵، شرط مرزی ورودی هوا "دبی جرمی"، شرط مرزی خروجی "فشار"^۶ و شرط مرزی محور مرکزی خشک کن "محور تقارن" تعریف شد. کل جریان هوای ورودی به خشک کن ۰/۲۴۲ مترمکعب بر ثانیه در دمای ۱۳۶ درجه سلسیوس است. با توجه به اینکه جرم حجمی هوا در این دما مساوی ۰/۸۵۳۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب است [۶]، کل جریان جرمی هوای ورودی مساوی ۰/۲ کیلوگرم بر ثانیه خواهد بود. با توجه به این که مدل تقارن محوری است، دبی کل بر عدد 2π تقسیم و در حل عددی مساوی ۰/۰۳۲ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. مقادیر دبی جرمی هر حلقه با توجه به مساوی بودن سرعت هوای ورودی به هر یک از حلقه‌ها و با توجه به مساحت هر حلقه محاسبه می‌شود. برای جریان‌های داخلی، شدت اغتشاش ورودی در مجموع به تاربخچه جریان سیال بستگی دارد و از این رو اگر جریان سیال کاملاً توسعه یافته باشد، شدت اغتشاش را می‌توان از روابط تجربی (۳) تخمین زد [۱۶].

$$Re_{d_h} = \rho V d_h / \mu_a \quad (3)$$

$$I = u' / u_{ave} \cong 0.16 (Re_{d_h})^{-1/8}$$

سرعت جریان هوای ورودی به خشک کن با توجه به جریان هوا و سطح مقطع کل سوراخ‌ها به دست می‌آید. سرعت هوای ورودی به خشک کن، که فقط دارای مؤلفه محوری است، مساوی ۳/۵۳ متر بر ثانیه گردید. بر این اساس، شدت اغتشاش ۵/۴ درصد محاسبه شد.

1 Gambit
2 Fluent (Ver. 15)
3 Segregated
4 Implicit
5 Wall
6 Pressure outlet

شرایط مرزی در خروجی خشک کن فشار خروجی^۱ منظور شده است. شدت اغتشاش جریان هوای خروجی نیز با توجه به رابطه (۵) محاسبه شد و ۳/۶۶ درصد به دست آمد.

ورودی جداره خنک کننده متقارن نیست لذا برای بررسی مسئله به صورت تقارن محوری با تعریف قطر هیدرولیکی می توان از مدل متقارن استفاده کرد. سطح مقطع لوله‌های ورودی و خروجی هوا به جداره، ۰/۱۱ مترمربع است. با مساوی قرار دادن مساحت ورودی با مساحت دیواره مخروط ناقص در نظر گرفته شده به منظور محل ورود، قطر هیدرولیکی محاسبه شد و برابر ۱۰۲ میلی‌متر به دست آمد. شرایط مرزی ورودی در این قسمت، سرعت ورودی^۲ در نظر گرفته شده است. برای اعمال این شرط مرزی، لازم است دبی جرمی، شدت آشفستگی، و قطر هیدرولیکی حلقه معرفی شوند. دبی هوای ورودی بر اساس ظرفیت فن مورد استفاده ۱۴۰۰ مترمکعب بر ساعت است و با توجه به این که جرم حجمی هوا در دمای ورودی ۲۹۸ کلوین، برابر با ۱/۱۷۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد [۶] و مدل متقارن محوری است، مقدار دبی جرمی به دست آمده پس از تقسیم بر عدد 2π مساوی با ۰/۷۲۴ کیلوگرم بر ثانیه به دست آمد. در این ناحیه عدد رینولدز ۲۳۵۶۲ و شدت اغتشاش ۴/۵ درصد گردید (رابطه ۵). شرط مرزی دهانه خروجی کانال هوا خنک از نوع فشار خروجی در نظر گرفته و قطر هیدرولیکی معادل با ۲۴/۶۶ میلی‌متر محاسبه شد. در این ناحیه سرعت جریان هوا ۳/۵۳ متر بر ثانیه اندازه گیری و فشار نسبی معادل صفر در نظر گرفته شده است. بر این اساس، عدد رینولدز ۵۶۹۵ و شدت اغتشاش ۴/۱۳ درصد محاسبه شد (رابطه ۳). برای مدل سازی، شرط مرزی جداره داخلی و بیرونی بدنه، سقف مخزن و لوله خروجی، دیواره تعریف شد. مطابق با نتایج آزمایش ها و مقادیر دمایی ارائه شده توسط حسگرها، میانگین دمای داخل خشک کن و جداره داخلی خنک کننده، به ترتیب برابر با ۳۸۰ و ۳۱۹ کلوین است لذا متوسط دمای جداره داخلی حدود ۳۵۰ کلوین در نظر گرفته شد. از طرفی در جداره خارجی خنک کننده مخزن چون از یک طرف با دمای محیط (۲۹۸ کلوین) و از طرف دیگر با دمای ۳۱۹ کلوین مجاور است، متوسط این دو دما (۳۰۹ کلوین) به عنوان دمای این جداره در نظر گرفته شد. خواص حرارتی - فیزیکی این نوع فولاد شامل جرم حجمی، هدایت حرارتی و گرمای ویژه را اینکروپرا و وایت [۶] ارائه داده اند و در متوسط دماهای داده شده قابل دستیابی است.

شرط مرزی با تعریف دمای جابه جایی آزاد برای دیواره ها اعمال می شود. شرایط مرزی جداره داخلی ناحیه مخروطی مخزن، به دلیل وجود سیال در دو طرف، دیوار دوطرفه^۳ است و برای جفت کردن دو ناحیه، گزینه کوپل^۴ استفاده و ضخامت دیوار نیز در نظر گرفته شد. انتقال حرارت در جداره خارجی نواحی استوانه و مخروط و نیز سقف مخزن به صورت جابه جایی^۵ تعریف شده است.

انتقال حرارت در جداره استوانه ای و مخروطی، جابه جایی آزاد روی سطح عمودی است. عدد نوسلت برای گستره عدد رایلی جهت تعیین ضریب انتقال حرارت جابه جایی از رابطه تجربی (۴) تعیین شد [۱]. انتقال حرارت در سقف مخزن جابه جایی آزاد در سطوح افقی می باشد. روابط لازم جهت محاسبه عدد نوسلت در صفحه افقی توسط گلدستین و همکاران و لیود و موران ارائه شده است [۴ و ۱۱].

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (4)$$

شرایط مرزی جت هوا در بدنه خشک کن

برای تعریف شرط مرزی جت هوا لازم است که اندازه سرعت، جهت بردارهای سرعت هوای ورودی، شدت آشفستگی و قطر هیدرولیکی منفذ نازل معین شود. قطر منفذ برابر با ۱ میلی‌متر و هوا با جریان ۲/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و فشار ۳/۵ بار به نازل انتقال یافت لذا سرعت جریان هوای جت نازل ۷۹۶ متر بر ثانیه به دست آمد. با توجه به مقدار سرعت نازل، عدد ماخ ۲/۲۹ خواهد شد. بنابراین به مارکون،

1 Pressure Outlet
2 Velocity Inlet
3 Two-Sided Wall
4 Coupled
5 Convection

چنانچه عدد ماخ کمتر از ۵ باشد می‌توان از معادلات آشفته‌گی حاکم بر جریانات تراکم‌ناپذیر استفاده نمود. عدد رینولدز و شدت اغتشاش جریان هوا در دهانه نازل از رابطه ۳ قابل محاسبه است. جدول ۲ مشخصات جریان در جت هوا را نشان می‌دهد.

جدول ۲- شرایط مرزی جت هوا

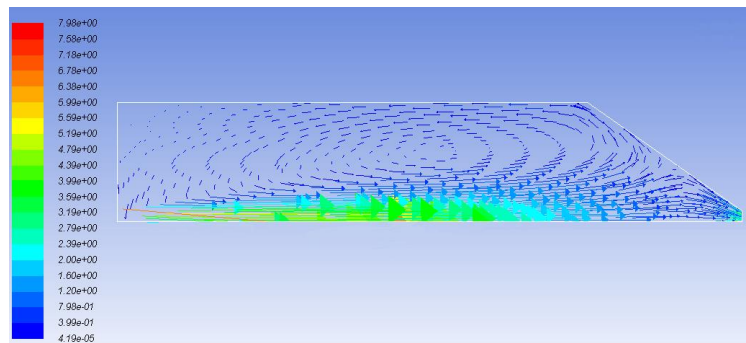
جرم حجمی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)	سرعت هوای نازل (متر بر ثانیه)	قطر هیدرولیکی (متر)	لزجت (کیلوگرم بر متر-ثانیه)	عدد رینولدز	شدت آشفته‌گی (درصد)
۱/۲۵۵	۷۹۶	۰/۰۰۱	$1/789 \times 10^{-5}$	۵۴۵۱۷	۴/۰۹

تحلیل نتایج

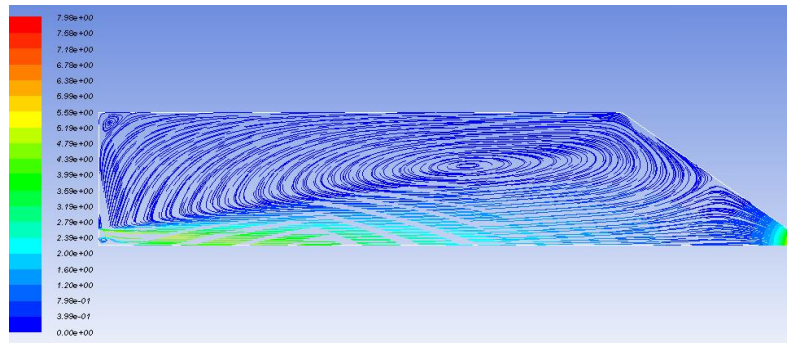
حرکت ذرات در خشک کن مستقیماً وابسته به الگوی جریان هوا می‌باشد. الگوی جریان هوا تعیین کننده زمان و محل برخورد ذرات به دیواره بوده و در شکست قطرات، قطر نهایی قطرات و الگوی پاشش تأثیر گذار است. نوسانات سرعت که خود وابسته به سرعت جریان هوای ورودی، شدت آشفته‌گی، زاویه و راستای ورود هوا و نیز شکل هندسی می‌باشد، الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

بردارهای سرعت و خطوط جریان قبل از استقرار جت هوا در بدنه مخزن

بردارهای سرعت و خطوط جریان حاصل از مدل‌سازی خشک کن بدون جت هوا در بدنه مخروطی، در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. محیط جریان شامل یک هسته مرکزی با سرعت بالا بوده که با امتداد به انتهای مخزن خشک کن، گسترش یافته و عریض می‌شود. قبل از رسیدن به وسط قسمت استوانه‌ای، یک جریان گردابه‌ای^۱ در خلاف جهت جریان ایجاد شده که باعث برگشت جریان در این ناحیه می‌گردد. جریان بازگشتی با سرعت کم، در اطراف هسته مرکزی به سمت بالای خشک کن ادامه مسیر می‌دهد. در بالای مخزن خشک کن، به علت گرادیان سرعت بالا، یک تنش برشی قوی بین هسته مرکزی و جریان آرام برگشتی ایجاد شده که باعث ایجاد مکش و تمایل جریان بازگشتی به سمت هسته مرکزی با سرعت بالا خواهد شد. با این وصف، با ادامه جریان به سمت انتهای خشک کن و گسترش آن، درصدی از آن وارد گردابه قسمت استوانه‌ای خشک کن گردیده و مابقی به سمت انتهای خشک کن ادامه مسیر می‌دهد. با ادامه سیر جریان هوا به سمت انتهای خشک کن، مقدار کمی از جریان به دیواره استوانه‌ای و بقیه به دیواره مخروطی برخورد کرده و از انتهای مخزن خارج می‌شود. در این ناحیه به علت مکش موجود هیچگونه جریان برگشتی وجود ندارد. تشکیل گردابه‌ها در اطراف جریان هسته مرکزی توسط هوانگ و همکاران گزارش شده است [۵].



شکل ۱: بردار سرعت در مخزن خشک کن بدون جت هوا در بدنه

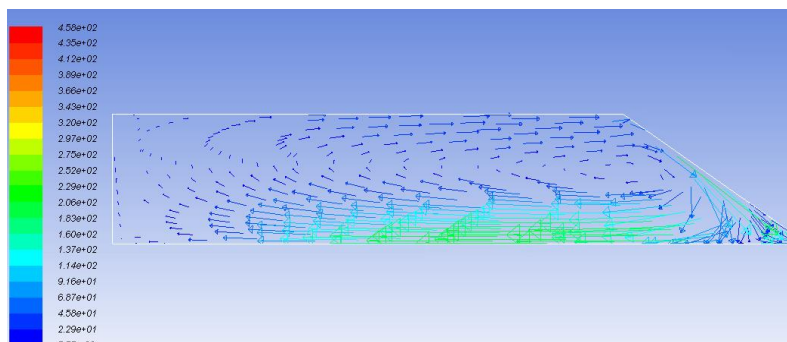


شکل ۲: خطوط جریان در مخزن خشک کن پاششی بدون جت هوا در بدنه

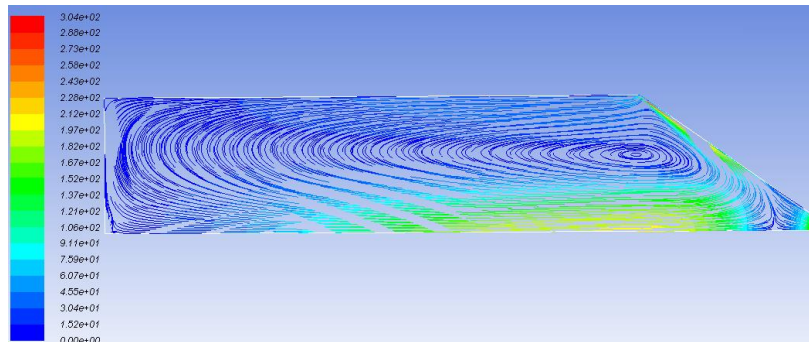
در اواسط قسمت استوانه‌ای مخزن، گردابه جریان در اطراف هسته مرکزی تشکیل شده است و تا اواسط قسمت مخروطی ادامه یافته است. در خشک کن پاششی مدل شده توسط روستاپور و همکاران [۱۵]، در محل اتصال قسمت استوانه‌ای به قسمت مخروطی مخزن، یک جریان گردابه‌ای در خلاف جهت جریان ایجاد شده که باعث برگشت جریان در این ناحیه می‌گردد.

بردارهای سرعت و خطوط جریان بعد از استقرار جت هوا در بدنه مخزن

به منظور بررسی کاهش نشست ذرات بر جداره مخروطی مخزن، یک جت هوا بر روی قسمت مخروطی در محل اتصال با قسمت استوانه‌ای مخزن و مماس بر بدنه مستقر شد و در مدل تعریف گردید. شکل‌های ۳ و ۴ بردارهای سرعت و خطوط جریان در خشک کن با شرایط کاربرد جت هوا در جداره را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، جریان هوا پس از ورود به مخزن به سمت دیواره متمایل شده و باعث ایجاد یک جریان گردابه‌ای در مخزن می‌شود و جهت جریان در هسته مرکزی به سمت بالا تغییر می‌کند. جریان پس از گردش در خشک کن از محل اتصال قسمت استوانه‌ای به مخروطی به دلیل وجود مکش قوی ایجاد شده توسط جت هوا به سمت خروجی هدایت می‌شود. چون تمام هوای خروجی از محل اتصال قسمت استوانه‌ای به مخروطی مخزن از روی جداره مخروطی به پایین هدایت می‌شود باعث کاهش نشست ذرات در این قسمت می‌شود. الگوی جریان در این شرایط مشابه نتایج به دست آمده توسط سوتول و همکاران است که خشک کن پاششی با صفحه توزیع کننده هوا را به صورت سه بعدی شبیه‌سازی عددی کرده‌اند. طبق نتایج اعلام شده، تمامی جریان در خشک کن در راستای یک مسیر به چرخش در آمده و جهت کلی گردابه‌ها به سمت خروجی است [۱۸].



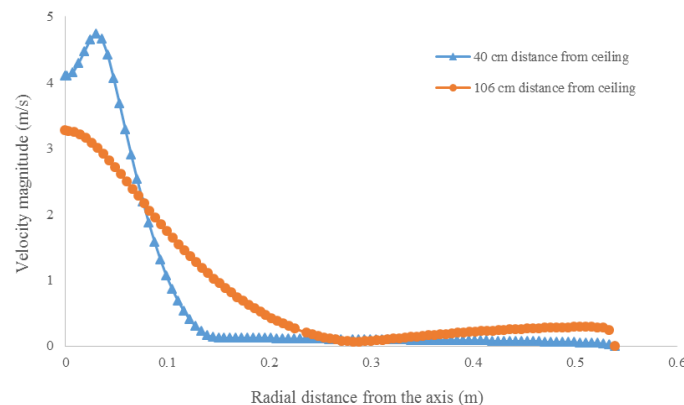
شکل ۳: بردار سرعت در مخزن خشک کن با جت هوا در بدنه



شکل ۴: خطوط جریان در مخزن خشک کن پاشی با جت هوا در بدنه

تغییرات شعاعی اندازه سرعت در شرایط عدم کاربرد جت هوا در بدنه خشک کن

تغییرات شعاعی اندازه سرعت در دو فاصله ۴۰ و ۱۰۶ سانتی متری از سقف مخزن، در شرایط عدم کاربرد جت هوا در بدنه مخزن در شکل ۵ نشان داده شده است. در فاصله ۴۰ سانتی متری تأثیر ورودی هوا کاملاً مشهود بوده به طوری که سرعت در این ناحیه دارای حداکثر مقدار در هسته مرکزی جریان می باشد. در ارتفاع‌های پایین تر (۱۰۶ سانتی متری) این تأثیر رفته رفته کمتر گردیده و تغییرات سرعت یکنواخت تر شده است. با دور شدن از محور مرکزی خشک کن، اندازه سرعت سیر نزولی داشته، بطوری که در دیواره‌های خشک کن به حداقل مقدار خود رسیده است. اندازه سرعت در قسمت مخروطی مقدار بیشتری نسبت به نقاط بالادست داشته است. تغییرات سرعت در نواحی مختلف خشک کن پاشی نوع کوتاه و در امتداد شعاعی توسط روستاپور و همکاران [۱۵]، شبیه سازی گردید و مشاهده شد که در ناحیه گذر هوا از قسمت استوانه‌ای به قسمت مخروطی مخزن گردابه‌ها تشکیل شده و سرعت جریان افزایش یافت.

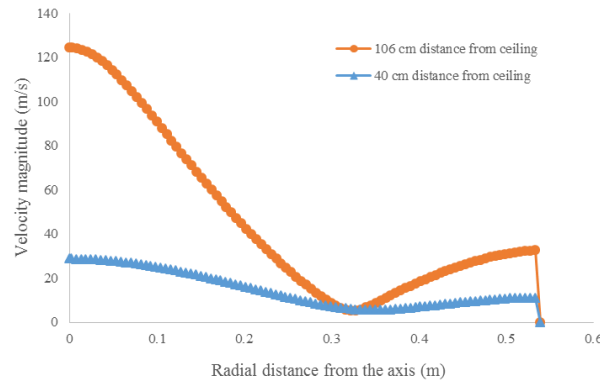


شکل ۵: تغییرات شعاعی اندازه سرعت در دو فاصله عمودی از سقف خشک کن بدون کاربرد جت هوا

تغییرات شعاعی اندازه سرعت در شرایط کاربرد جت هوا در بدنه خشک کن

تغییرات سرعت شعاعی در خشک کن پس از قرار دادن جت هوای فشرده مماس بر بدنه داخلی در محل اتصال قسمت استوانه‌ای و مخروطی، در فواصل ۴۰ و ۱۰۶ سانتی متری از سقف مخزن بررسی گردید (شکل ۶). همانطور که مشاهده می شود سطح سرعت با استقرار جت هوا در بدنه افزایش یافته است. همچنین مقادیر سرعت در ناحیه پایین مخزن نسبت به ابتدای مخزن بیشتر است زیرا ورود هوای با

سرعت بالا توسط جت هوای بدنه متعاقباً جریان هوا در مخزن خشک کن را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش سرعت نسبی هوا خواهد شد. با نزدیک شدن به سمت خروجی خشک کن به دلیل کاهش سطح در این محل، افزایش سرعت در جداره مشهود خواهد بود.



شکل ۶: تغییرات شعاعی اندازه سرعت در دو فاصله عمودی از سقف خشک کن با به کارگیری جت هوا

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده عبارتند از:

- ۱- الگوی جریان هوا در خشک کن در شرایط بدون جت هوای فشرده بر روی جداره مخروطی نشانگر این است که گردابه‌های ایجاد شده در راستای محوری بزرگتر از شعاعی بوده و در نزدیکی محل اتصال قسمت مخروطی و استوانه‌ای مقداری از جریان به صورت گردابه‌های کوچک برگشتی از کنار قسمت استوانه‌ای به سمت بالای مخزن خشک کن در جریان هستند که به دلیل سرعت هوای ورودی و تنش برشی ایجاد شده به واسطه این سرعت با جریان برگشتی مجدداً جریان برگشتی به جریان اصلی بازگشته و در امتداد محور خشک کن به سمت خروجی امتداد مسیر خواهد داد.
- ۲- الگوی جریان هوا در شرایط وجود جت هوای فشرده در قسمت مخروطی نشان می‌دهد که هوای ورودی به خشک کن به سمت دیواره مخزن متمایل می‌شود و در محل تقاطع جداره‌های استوانه‌ای و مخروطی سرعت هسته مرکزی بیشتر از سایر نقاط و به سمت بالا است. به دلیل ورود جت هوای فشرده با سرعت بالا، یک خلاء نسبی ایجاد شده و باعث ایجاد جریان چرخشی در مخزن و هدایت ذرات به سمت خروجی می‌شود.
- ۳- تغییرات شعاعی سرعت در شرایط عدم به کارگیری جت هوا در بدنه مخروطی نشان دهنده کاهش سرعت با ادامه جریان به سمت پایین مخزن است. در نواحی بالای مخزن، سرعت در ناحیه هسته مرکزی جریان حداکثر مقدار را دارا بوده که با خروج از این ناحیه و نزدیک شدن به جداره مخزن، کاهش می‌یابد.
- ۴- تغییرات شعاعی سرعت در شرایط کاربرد جت هوای فشرده بر روی بدنه، نشان می‌دهد که در نواحی میانی مخزن نسبت به نواحی بالای مخزن خصوصاً در اطراف هسته مرکزی بیشتر است که به علت ارسال هوای پر سرعت توسط جت هوا در محل اتصال نواحی استوانه‌ای و مخروطی مخزن می‌باشد.



مراجع

- 1- Churchill, S. W. and Chu, H. H. S. 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Tran.* 18(11): 1323-1329.
- 2- Cotabarren, I. M., Bertin, D., Razuc, M., Ramirez-Rigo, M. V. and Pina, J. 2018. Modeling of the spray drying process for particle design. *Chemical Engineering Research and Design*, Article in Press.
- 3- Gabites, J. R., Abrahamson, J. and Winchester, J. A. 2010. Air flow patterns in an industrial milk powder spray dryer. *Chem. Eng. Res. Des.* 88(7): 899-910.
- 4- Goldstein, R. J., Sparrow, E. M., and Jones, D. C. 1973. Natural convection mass transfer adjacent to horizontal plates. *Int. J. Heat Mass Tran.* 16(5): 1025-1035.
- 5- Huang, L., Kumar K. and Mujumdar A. S. 2003. Use of computational fluid dynamics to evaluate alternative spray chamber configurations. *Dry. Technol.* 21(3): 385-412.
- 6- Incropera, F. P. and De Witt, D. P. 2002. *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons. New York.
- 7- Jin, Y. and Chen, X. D. 2009. Numerical study of the drying process of different sized particles in an industrial scale spray dryer. *Dry. Technol.* 27(3): 371-381.
- 8- Keshani, S., Daud, W. R. W., Nourouzi, M. M., Namvar, F. and Ghasemi, M. 2015. Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling. *Journal of Food Engineering*, 146: 152-162.
- 9- Kieviet, F. G. 1997. Modeling quality in spray drying. Ph. D. Thesis. Eindhoven University of Technology. The Netherlands.
- 10- Langrish, T. A. G., Williams, J., and Fletcher, D. F. 2004. Simulation of the effects of inlet swirl on gas flow patterns in a pilot-scale spray dryer. *Chem. Eng. Res. Des.* 82(7): 821-833.
- 11- Lloyd, J. R. and Moran, W. R. 1974. Natural convection adjacent of horizontal surfaces of various planforms. *J. Heat Trans-T. ASME.* 96(4): 443-447.
- 12- Mezhericher, M., Levy, A. and Borde, I. 2009. Modeling of droplet drying in spray chambers using 2D and 3D computational fluid dynamics. *Dry. Technol.* 27(3): 359-370.
- 13- Oakley, D. E., and Bahu, R. E. 1993. Computational modelling of spray dryers. *Comput. Chem. Eng.* 17(1): 493-498.
- 14- Patniboon, A., Ponpesh, P., Soottitantawat, A. and Arpornwichanop, A. 2014. Theoretical analysis of the wall deposition of particles in spray dryers. *Chemical Engineering Transactions*, 39: 571-576.
- 15- Roustapour, O.R., Hosseinalipour, M., Ghobadian, B., Mohaghegh, F. and Maftoon-Azad, N. 2009. A proposed numerical-experimental method for drying kinetics in a spray dryer. *J. Food Eng.* 90(1): 20-26.
- 16- Roustapour, O.R., Tahhavor, A.R., Afsari, A. and Sayyari, A.R. 2013. Computational fluid dynamic simulation of flow pattern and heat transfer in a pilot plant spray dryer with cooling air jacket. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 14 (1): 89- 106.
- 17- Salem, A., Ahmadlouiedarab, M. and Ghasemzadeh, K. 2011. CFD approach for the moisture prediction in spray chamber for drying of salt solution. *J. Ind. Eng. Chem.* 17(3): 527-532.
- 18- Southwell, D. B., Langrish, T. A. G. and Fletcher, D. F. 1999. Process intensification in spray dryers by turbulence enhancement. *Chem. Eng. Res. Des.* 77(3): 189-205.
- 19- Woo, M. W., Daud, W. R.W., Tasirin, S. M., Talib, M. Z. M. 2009. Controlling food powder deposition in spray dryers: Wall surface energy manipulation as an alternative. *Journal of Food Engineering.* 94: 192-198.



دانشگاه شهید چمران اهواز
انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



دوازدهمین کنگره ملی
مهندسی مکانیک بیوسیستم
و مکانیزاسیون ایران

۱۶ - ۱۸ بهمن ماه ۱۳۹۸

دانشگاه شهید چمران اهواز

- 20- Woo, M. W., Rogers, S., Lin, S. X. Q., Selomulya, C. and Chen, X. D. 2011. Numerical probing of a low velocity concurrent pilot scale spray drying tower for mono-disperse particle production- unusual characteristics and possible improvements. Chem. Eng. Processing. 50(4): 417-427.



Numerical modeling of spray dryer with air jet nozzle

Omid Reza Roustapour^{*1}, Hamid Reza Gazor² and Abolhasan Salehi³

1. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (o.roostapour@areo.ir)
2. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (hgazor@yahoo.com)
3. Graduated students of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Bafgh Branch (hasan.salehi100@gmail.com)

Abstract

In current research, air flow in a spray dryer model was simulated by computational fluid dynamics method (CFD) and employing Fluent software. Air flow pattern was modeled in the dryer in two conditions of considering air jet nozzle in cone part of the chamber or not. Results showed, when air jet nozzle was not employed, air velocity on top of the chamber was rather than another part of the chamber and gradually decreased toward the bottom of tower. Air velocity was increased extremely in the central core flow of the chamber and flow direction changed toward the top of dryer while the air jet nozzle considered in the model. Variation of radial velocity illustrated an increase in velocity magnitude in the chamber. Also, the air velocity at bottom of the chamber was more than that on top of the chamber, because high air jet velocity influenced on flow medium and increased air velocity magnitude.

Keywords: Spray dryer, Air flow pattern, Computational fluid dynamics, Air jet nozzle

*Corresponding author

E-mail: o.roostapour@areo.ir