

تأثیر فشار و قطر اوریفیس شیپوره بر اندازه قطرات و تخلخل ذرات در یک خشک کن پاششی صنعتی

مجتبی سمنانی رهبر^{۱*}، سیدعلیرضا تاجزاده^۲، غلامرضا ژیلکزاده^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

۲- دانشگاه صنعتی مالکاشتر - مجتمع مواد و مهندسی شیمی

۳- شرکت پاکسان - واحد تولید پودر

پست الکترونیکی: msrahbar@yahoo.com

چکیده

در این مقاله تأثیر فشار و قطر شیپوره در خشک کن پاششی بر روی کیفیت پودر که در صنعت شوینده تولید می‌گردد مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که تغییر فشار شیپوره، از یک سو می‌تواند سبب تغییر مشخصی در قطر قطرات پاشیده شده در خشک کن گردد و از سوی دیگر به تخلخل بیشتر پودر حاصل از خشک شدن منجر شده و سبب ارتقاء کیفیت محصول شود که این افزایش کیفیت، انحلال بیشتر پودر، جلوگیری از کلوخه شدن و دستیابی به دانسیته توده‌ای مناسب و یکنواخت را در پی خواهد داشت. برای شیپوره‌های با قطر کمتر (با قطر ۳/۲ و ۳/۴ میلی‌متر) در فشارهای پائین‌تر (حدود ۴۵۰ اتمسفر) تأثیر قطر شیپوره در اندازه قطره قابل ملاحظه نیست ولی با افزایش فشار نقش قطر شیپوره قابل ملاحظه خواهد بود. در مورد شیپوره‌های با قطر بزرگتر (۴/۲ و ۴/۴ میلی‌متر) می‌توان گفت که افزایش قطر در کلیه فشارها افزایش قطر قطره را در پی خواهد داشت. در حالتیکه فشار در محدوده کمتر از ۸۰-۷۰ اتمسفر است افزایش فشار سبب کاهش قطر قطرات خواهد شد که این امر افزایش تخلخل را در پی خواهد داشت. در محدوده فشار بیشتر از ۸۰-۷۰ اتمسفر، افزایش فشار سبب افزایش قطر قطرات می‌گردد. نتایج ارائه شده همچنین نشان می‌دهند که با افزایش قطر شیپوره، عملکرد خشک کن پاششی در ایجاد ذرات با تخلخل بیشتر مناسبتر خواهد بود.

کلمات کلیدی: خشک کن پاششی، شوینده، شیپوره، تخلخل، فشار

مقدمه

پودرهای شوینده است که این عمل توسط خشک کن پاششی^۱ صورت

می‌گیرد [۱ و ۲].

خشک کن پاششی بصورت گسترده‌ای در صنایع شیمیایی، غذایی، دارویی و آرایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صنعت آرایشی - بهداشتی، فرایند خشک کردن یکی از مهمترین بخشهای فرایند تولید

1. Spray drier

کشش سطحی مایع در این نوع باعث افزایش یکنواختی اسپری می‌شود ولی این عمل به بهای کوچک شدن اندازه متوسط قطره‌ها تمام می‌شود [۴].

از آنجائیکه در صنعت شوینده، خوراک ورودی به برج خشک‌کن پاششی یک سیال بسیار ویسکوز بوده و یکنواختی ذرات قطره شده از اهمیت خاصی برخوردار است به همین دلیل در این صنعت اکثراً از شیپوره فشاری و یا به عبارت دقیق‌تر از شیپوره فشاری گریز از مرکز^۶ که به نام شیپوره چرخشی^۷ نیز نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد. شکل (۱) اجزای یک شیپوره فشاری را ارائه می‌کند. شیپوره فشاری به واسطه عبور جریان از اوریفیس و تبدیل معادل فشار^۸ به ارتفاع معادل سرعت^۹، انرژی فشاری را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند. این لایه‌ها توسط عامل واسطه که همیشه هواست به صورت قطره پاشیده می‌شوند.

شیپوره‌های فشاری در مقایسه با دو روش دیگر، قطرات با قطر بزرگتری ایجاد می‌کنند. این شیپوره‌ها بدلیل ایجاد سایش، برای اسپری کردن محلول‌های سوسپانسیون مناسب نیستند. قطر قطراتی که توسط شیپوره‌های صنعتی متداول ایجاد می‌شود اغلب در حدود $10^3 - 10^2 \mu m$ است. اگرچه این گونه شیپوره‌ها در کاربردهای مربوط به احتراق عموماً قطراتی در حد چند میکرون ایجاد می‌نمایند، اما سرعت بالای اسپری کننده و افزایش فشار در شیپوره سبب کاهش قطر قطرات می‌گردد که این امر خود، افزایش دانسیته توده‌ای محصول خشک شده را موجب می‌شود [۴].

اندازه قطره حاصل از اسپری کردن خوراک، از خواص آن مانند دانسیته، گرانی و کشش سطحی تأثیر می‌پذیرد. با افزایش دانسیته، قطر قطرات کوچکتر می‌شود ولی در مورد کشش سطحی این موضوع برعکس است. مایعات دارای کشش سطحی بالا به سختی اسپری می‌شوند. بعضی از داده‌ها نشان می‌دهد که اندازه قطره متناسب با توان یک سوم مقدار کشش سطحی است. گرانی بالا معمولاً سبب پاشش در زاویه کوچک و مسیر باریک می‌گردد و به عنوان یک قاعده کلی، در مورد شیپوره‌های فشاری اندازه قطره را می‌توان متناسب با توان یک چهارم گرانی فرض نمود. شکل (۲) تغییرات قطر قطره را برحسب

در صنعت تولید، پودر شوینده که یکی از کاربردهای خشک‌کن پاششی است، پودری مناسب است که علاوه بر دارا بودن خواص شیمیایی مناسب از نظر قدرت شویندگی، سفیدکنندگی، حفظ رنگ و کیفیت منسوجات و... دارای دانسیته توده‌ای^۱ مورد نظر و توزیع مناسب آن می‌باشد که باعث جلوگیری از کلوخه شدن محصول، عدم یکنواختی دانه‌بندی ذرات، یکنواخت نبودن توزیع ذرات درون قوطی بسته‌بندی و مشکل اضافه وزن در زمانیکه بسته‌بندی به صورت حجمی است می‌شود [۳].

فرایند خشک کردن پاششی را می‌توان در چهار مرحله اصلی خلاصه نمود.

۱- قطره‌سازی خوراک^۲

۲- تماس قطرات با گاز داغ

۳- خشک شدن قطرات

۴- جداسازی محصول خشک شده از گاز

قطره‌سازی خوراک و توزیع ذرات در هنگام پاشش در فرایند خشک کردن، یکی از مراحل تعیین کننده در خواص محصول است. با توجه به اینکه نسبت بالای سطح مؤثر قطره به جرم آن تأثیر زیادی بر سرعت تبخیر دارد و می‌تواند به حصول ذرات کوچک و با تفرق واحد (ذرات با توزیع اندازه نزدیک به هم) بیانجامد، این مرحله حساسیت فوق العاده‌ای می‌یابد.

قطره‌سازی خوراک درون خشک‌کن به وسیله یکی از سه نوع تجهیزات ذیل انجام می‌پذیرد:

۱- اتمایزر چرخشی^۳

۲- شیپوره‌های فشاری^۴

۳- شیپوره‌های دو فازی^۵

شیپوره دو فازی اغلب برای قطره‌سازی مایعات نیوتنی با گرانی کم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه در قطره‌سازی مایعات نیوتنی یا غیرنیوتنی با گرانی بالا هم کاربرد دارد. اتمایزر چرخشی برای تشکیل اسپریهای یکنواخت مناسب نیست ولی می‌توان به کمک آن اسپریهایی با قطراتی کوچک و هم‌اندازه تولید کرد. افزایش گرانی و

6. Centrifugal Pressure nozzles

7- Swirl

8. Pressure head

9. Velocity head

1. Bulk Density

2. Atomization

3. Rotary Atomizer

4. Pressure Nozzles

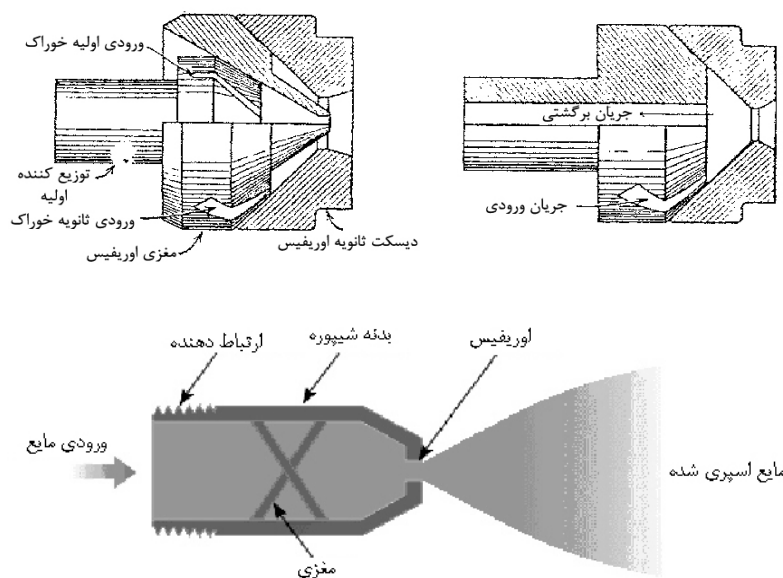
5. Two-fluid Nozzles

گرانروی خوراک ارائه می‌کند [۵].

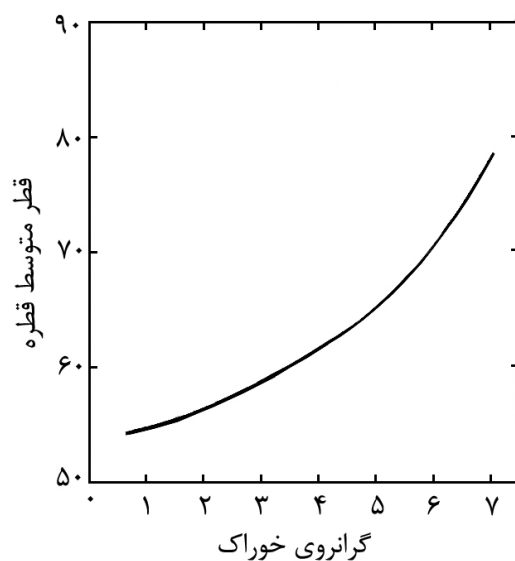
چرخش مایع در حین خروج، یک مخروط اسپری شده از مایع خروجی (همانند شکل ۳) را ایجاد می‌کند.

در فشارهای بالاتر و یا پایین‌تر (با فرض ΔP ثابت در شیپوره) تمایل به

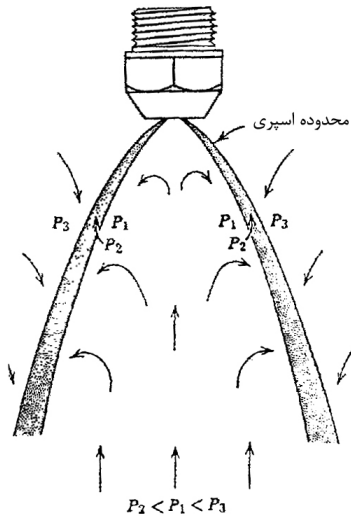
درشت شدن دانه‌ها در اثر اسپری شدن مشاهده می‌گردد. به دلیل وجود مسیرهای جریان شکل (۳) یک محیط چگال، به گاز بیشتری اجازه عبور می‌دهد.



شکل ۱- تصویر و شمای اجزای شیپوره فشاری گریز از مرکز



شکل ۲- تغییرات قطر قطره اسپری شده بر حسب گرانروی خوراک



شکل ۳- مسیرهای مختلف جریان در یک اسپری کننده

متوسط کمتر از دو میلیمتر در مقیاس صنعتی تولید نماید [۸].
 دوموچل و همکارانش^۴ جریان سیال ویسکوز را در یک شیپوره فشاری
 گریز از مرکز مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها با استفاده از روش تحلیل
 عددی دریافتند که اوریفیس شیپوره، جزء کلیدی در عملکرد آن است
 و توزیع سرعت در آن می‌تواند اطلاعات جامع و منطبق با آزمایشها در
 مورد زاویه پاشش ارائه نماید [۹]. هوویت^۵ اندازه قطره را در یک
 شیپوره چرخشی مورد بررسی قرار داده و مقدار متوسط قطر حجمی و
 نسبت آن به تعداد قطرات را بصورت تابعی از دانسیته، گرانشی و
 کشش سطحی، شدت جریان خوراک، سرعت هوا و چرخش شیپوره
 ارائه نموده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های موجود نمی‌توانند
 در مقیاس واقعی رفتار قطرات اسپری شده و اندازه آنها را پیش‌بینی
 نمایند [۱۰]. تحقیقات لورسون و همکارانش^۶ در مورد اندازه قطرات و
 ذرات اسپری شده نیز مؤید آن است که شکل هندسی و ابعاد اوریفیس
 شیپوره و جریان هوا کنترل‌کننده اندازه قطرات است ولی غلظت
 خوراک تأثیر آنچنانی ندارد [۱۱]. اگرچه نقش ابعاد شیپوره و فشار در
 اندازه قطرات از طرف اغلب محققین مورد تأکید قرار گرفته است ولی
 با توجه به نکات مختلفی که در این فرآیند وجود دارد بررسی

بنابراین پاشش در یک ناحیه باریک غلیظ شده و در نتیجه، قطرات
 به هم چسبیده و تشکیل قطرات بزرگتر را می‌دهند [۵]. دومبروکسی و
 هسون^۱ ویژگیهای جریان را در شیپوره فشاری گریز از مرکز برای
 اسپری مایعات با گرانشی کم مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسیهای
 آنها نشان می‌دهد که تأثیر برخی از پارامترهای هندسی شیپوره، مانند
 نسبت قطر محفظه چرخش به قطر اوریفیس و طول اوریفیس به قطر
 آن بر روی ضریب تخلیه و زاویه پاشش با آنچه بصورت تئوری تخمین
 زده می‌شود تفاوت دارد و تنها زمانی می‌توان بین ضریب تخلیه و زاویه
 پاشش ارتباط منطقی یافت که نسبت طول اوریفیس به قطر آن از یک
 مقدار حداکثر تجاوز ننماید [۶]. کوفرث و همکارانش^۲ نیز تأثیر نحوه
 اسپری شدن بر روی جریان را برای شیپوره‌های دو فازی بررسی
 کرده‌اند. آنها در مقیاس نیمه‌صنعتی دریافتند که رژیم جریان وابستگی
 زیادی به ویژگیهای هندسی شیپوره مانند طول اوریفیس و قطر آن
 دارد. برای زمانیکه نسبت طول به قطر اوریفیس کمتر از ۲ است
 متوسط ذرات اسپری شده دارای رژیم جریان آرام هستند [۷]. هینو و
 همکارانش^۳ نیز شیپوره جدیدی برای استفاده در تولید پودرها ارائه
 نموده‌اند که دارای چهار سیال است و می‌تواند ذرات ریز با قطر

4. Dumochel et al.
 5. Hewitt.
 6. Elvesson et al.

1. Dombrowski and Hasson
 2. Kufferath et al.
 3. Hino et al.

پارامترهای متفاوت بویژه در مقیاس صنعتی هنوز هم از موضوعات مورد توجه محققین است.

$$C_D = \sqrt{\frac{a^3}{2-a}}, \quad a = 1 - \left(\frac{d_c}{d}\right)^2 \quad (3)$$

با فرض اندازه حرکت زاویه‌ای ثابت که قبلاً به صورت چرخش آزاد سیال به آن اشاره شد سرعت مماسی سیال خوراک برای شیپوره‌های دارای محفظه چرخش تخت به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_t = \frac{0.642 Q R}{A d} \quad (4)$$

زاویه پاشش نیز می‌تواند به صورت تابعی از C_D مطابق شکل (۴) ارائه گردد اگرچه ضریب تخلیه - C_D - خود نیز به فرم هندسی شیپوره ارتباط دارد (شکل ۵).

ارتباط قطر متوسط قطرات اسپری شده با سرعت مماسی و محوری خوراک ورودی را می‌توان بصورت زیر ارائه نمود [۱۵ و ۱۶].

$$D = \frac{7670d^{0.33}}{(V_a^{0.11})(V_t^{0.4})} \quad (5)$$

$$D = \frac{\text{حجم قطره}}{\text{سطح قطره}} \quad \text{که در آن:}$$

این قطر متوسط به صورت \bar{D}_{32} نیز نمایش داده می‌شود [۱۷].

حرکت سیال در شیپوره

بررسی حرکت سیال در شیپوره فشاری چرخشی با توجه به نقش شیپوره در چگونگی اسپری قطرات می‌تواند در تخمین برخی از پارامترهای مؤثر کمک شایانی نماید. حرکت هوا در مرکز شیپوره در مسیری صورت می‌گیرد که به مغزی هوا^۱ معروف است و می‌توان برای آن یک قطر معادل (d_c) تعریف نمود.

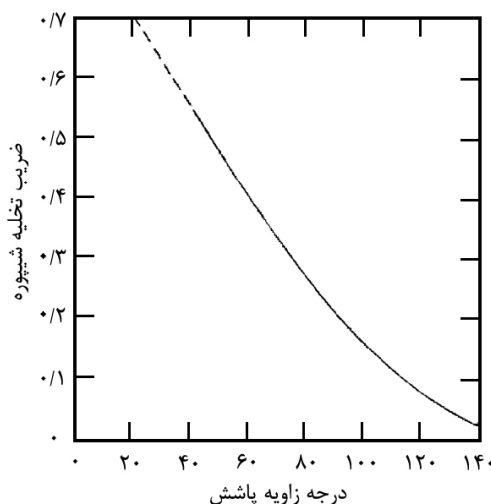
سرعت محوری متوسط سیال خوراک به صورت تابعی از d_c و قطر اوریفیس شیپوره (d) بصورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد [۱۲]:

$$V_a = \frac{0.409 Q}{d^2 - d_c^2} \quad (1)$$

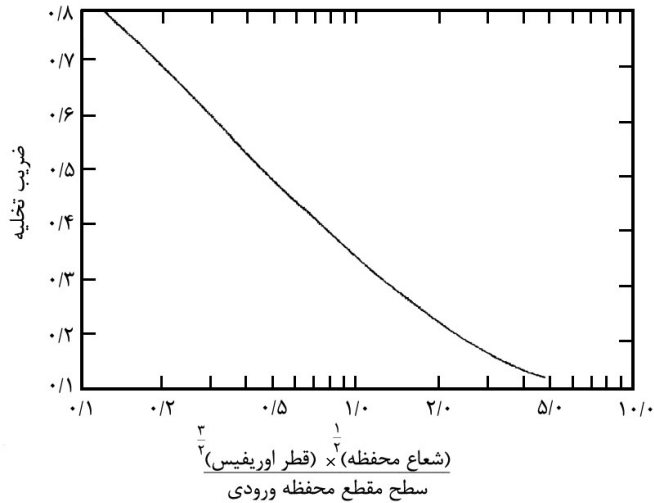
که در آن Q شدت جریان حجمی خوراک است. d_c را می‌توان با فرض چرخش آزاد سیال درون شیپوره توسط ضریب تخلیه C_D به صورت رابطه (۲) محاسبه نمود [۱۳]:

$$C_D = \frac{0.0355 Q \rho^{0.5}}{(\Delta P)^{0.5} d^2} \quad (2)$$

از سوی دیگر می‌توان داشت [۱۴]:



شکل ۴-ارتباط بین ضریب تخلیه و زاویه پاشش

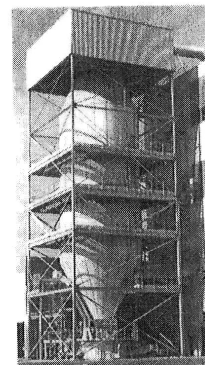
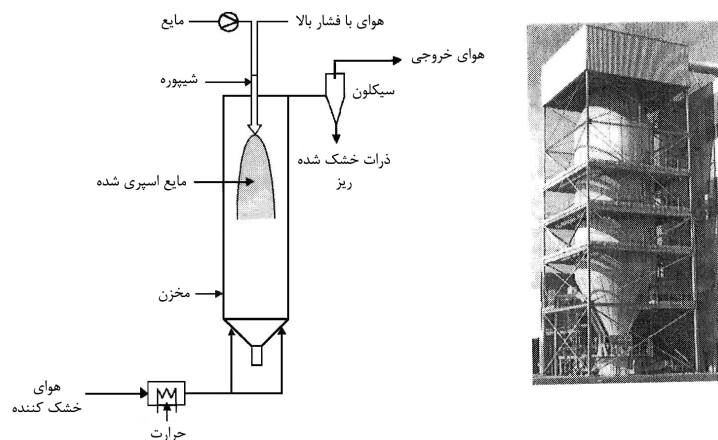


شکل ۵- ارتباط ضریب تخلیه با ابعاد هندسی شیپوره

قسمت تجربی

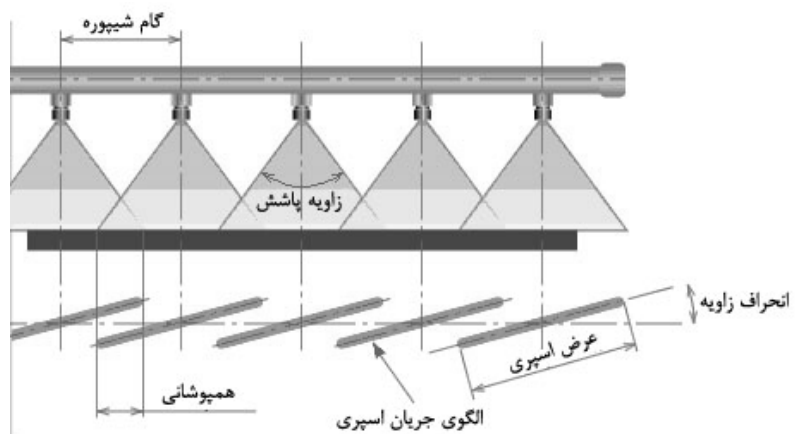
با توجه به اهمیت چگونگی قطره‌سازی خوراک در کیفیت ذرات پودر تولید شده و به منظور افزایش کمی و کیفی محصول، تأثیر تغییر فشار و قطر شیپوره بر روی ابعاد قطره و مقدار تخلخل ذرات پودر تولیدی در خشک‌کن پاششی موجود، در شرکت پاکسان مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. شرکت پاکسان دارای خشک‌کن با جریان ناهمسو و دارای مشخصات ارائه شده در جدول (۱) است که توسط شرکت ایتالیایی بالسترا طراحی، ساخته و نصب شده است (شکل ۶). خوراک ورودی به این خشک‌کن، دوغاب^۱ بسیار غلیظ و ویسکوز (با گرانیروی حدود ۱۲۵ هزار سانتی‌پواز) است که توسط پمپ هموژن‌کننده

(هموژنایزر) به بالای برج که کمربند شیپوره‌ها در آنجا قرار دارد فرستاده می‌شود. شکل (۷) شمایی از کمربند شیپوره مورد استفاده را ارائه می‌کند. شرایط عملیاتی برج خشک‌کن مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است. با توجه به آنکه در هنگام آزمایش‌ها برج مزبور در خط تولید قرار داشت هر یک از آزمایش‌ها در دو شیفت و هر شیفت دوبار انجام گردید. از آنجائیکه قطر ذرات در پودرها باید کمتر از ۰/۴۵ میلی‌متر باشد تا بهترین تخلخل حاصل شود به همین دلیل قطر شیپوره‌ها در محدوده ۳/۲-۴/۴ میلی‌متر تغییر داده شد.



شکل ۶- شماء و تصویر خشک‌کن پاششی صنعتی مورد استفاده در آزمایش‌ها

1. Slurry



شکل ۷- کمربند شیپوره مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱- مشخصات ابعادی برج خشک‌کن پاششی

نوع خشک‌کن	نوع شیپوره	قطر برج (m)	ارتفاع برج (m)	تعداد شیپوره‌ها	شعاع کانال (mm)
جریان ناهمسو	فشاری گریز از مرکز	۸	۴۳	۲۰	۳/۵

جدول ۲- شرایط عملیاتی برج خشک‌کن پاششی

درجه حرارت هوای گرم ورودی (°C)	درجه حرارت هوای خروجی (°C)	سرعت هوای گرم ورودی (m/s)	دانسیته خوراک (kg/m ³)	درصد جامد خوراک	گراتروی خوراک (cp)
۴۰۰-۴۵۰	۹۰-۱۰۰	۰/۳-۰/۶	۱۲۰۰	۵۰-۶۰	۱۲۵۰۰۰

نتایج و بحث

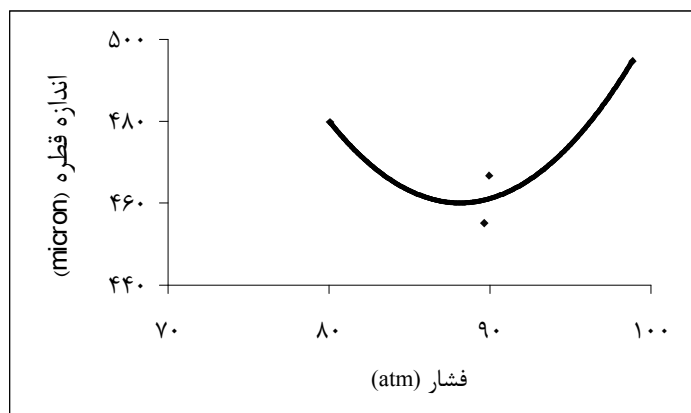
نحوه پاشش خوراک ورودی در خشک‌کن پاششی می‌تواند از مشکلات دیده‌ای که در تولید پودرهای شوینده پیش می‌آید جلوگیری نماید. بهترین پودر از نظر تخلخل، زمانی بدست می‌آید که رابطه زیر برقرار باشد [۳]:

$$\text{Alpha ratio} = \alpha = \frac{d_c}{D} > 0.8 \quad (۶)$$

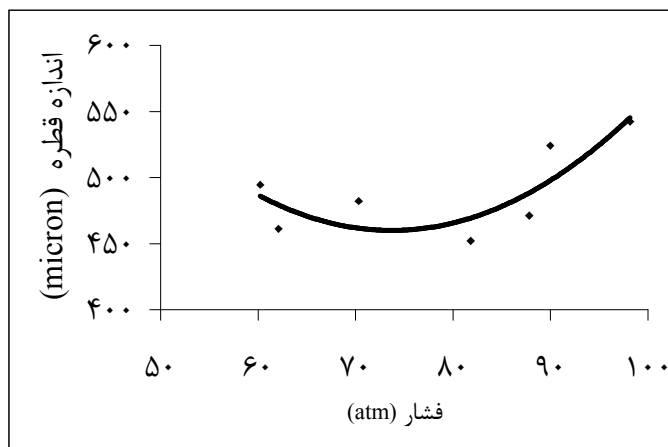
اگر هنگام قطره سازی خوراک، این نسبت ایجاد نگردد، دانه‌های پودر حاصل، از تخلخل مناسب برخوردار نبوده که این امر یا منجر به شکستگی و ایجاد دانه‌های ریزتر می‌شود و یا به دلیل وجود میزان آب بیشتر، آگیری از قطرات مشکل‌تر می‌شود و در نتیجه، پودر حاصل دارای رطوبتی بیش از مقدار مجاز خواهد بود که سبب کلوخه شدن و چسبندگی پودر می‌گردد. در صورتی که قطرات کروی بوده و قطر آنها برابر با قطر اوریفیس شیپوره فرض شود، بهترین شرایط برای ایجاد

فشار در ناحیه‌ای باشد که با افزایش فشار، قطر قطره کاهش یابد که این امر افزایش α و کیفیت بالاتر پودر حاصل را در پی خواهد داشت. شکل‌های (۱۵-۱۲) نیز مؤید این نکته‌اند زیرا نشان می‌دهند که در حالتیکه فشار در محدوده کمتر از ۸۰-۷۰ اتمسفر است افزایش فشار سبب کاهش قطر قطرات خواهد شد که این امر افزایش α را در پی خواهد داشت. در محدوده فشار بیشتر از ۸۰-۷۰ اتمسفر افزایش فشار سبب افزایش قطر قطرات می‌گردد که این امر با توجه به رابطه (۶) سبب کاهش α خواهد شد؛ اگرچه این تغییرات در شیپوره‌های با قطر بیشتر نسبت به شیپوره‌های با قطر کمتر محدودتر است.

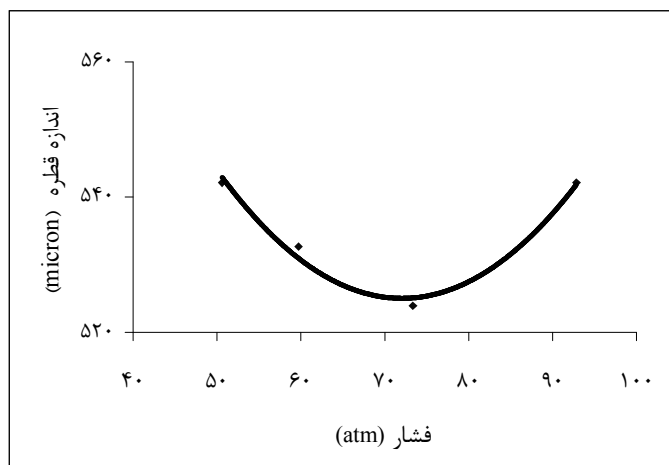
تخلخل مناسب بوجود خواهد آمد. برای بررسی اثر فشار به قطر ذرات پاشیده شده در قطره‌های مختلف شیپوره از الگوی حرکت سیال که در قسمت پیشین مورد بحث قرار گرفته است استفاده گردید. شکل‌های (۱۱-۸) نشان می‌دهند که با افزایش فشار، قطر قطرات پاشیده شده برای قطرهای مختلف شیپوره در محدوده‌ای کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که متوسط قطر قطرات در یک محدوده، با افزایش فشار کاهش می‌یابد و در ناحیه دیگر بدلیل کاهش ضخامت دیواره قطره و افزایش هوای موجود در آن، افزایش پیدا می‌کند. لذا باید محدوده عملیاتی



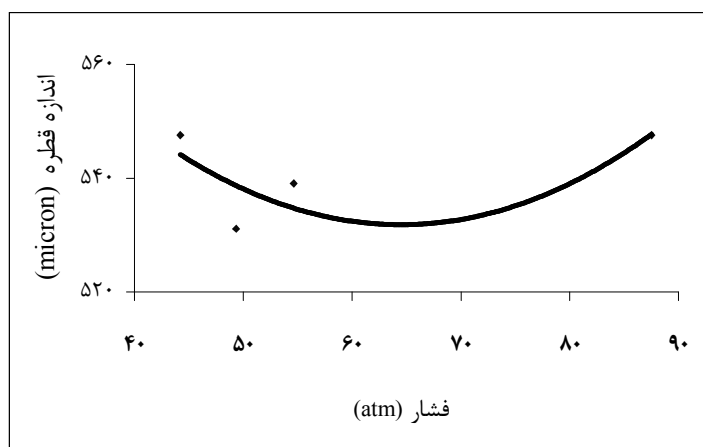
شکل ۸- تغییرات اندازه قطره برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۳/۲ میلی‌متر



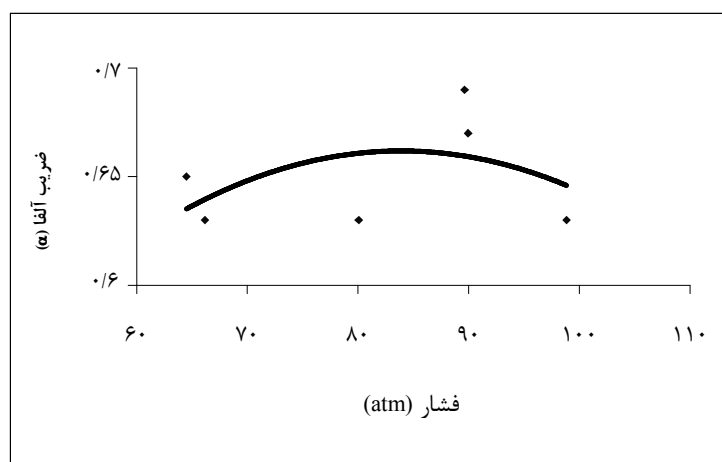
شکل ۹- تغییرات اندازه قطره برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۳/۴ میلی‌متر



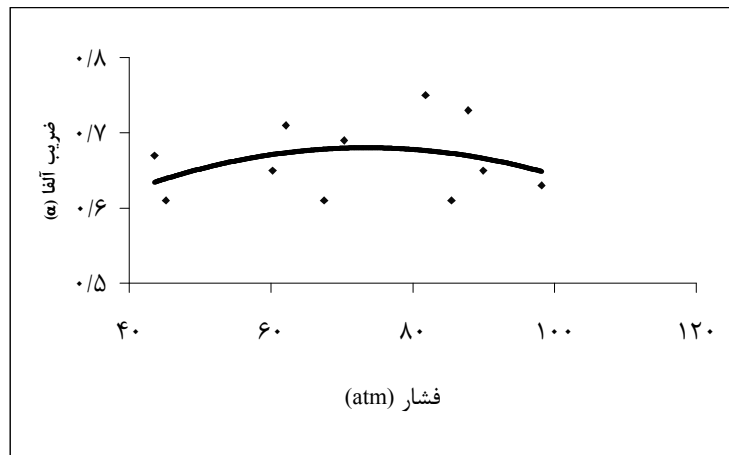
شکل ۱۰- تغییرات اندازه قطره برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۴/۲ میلیمتر



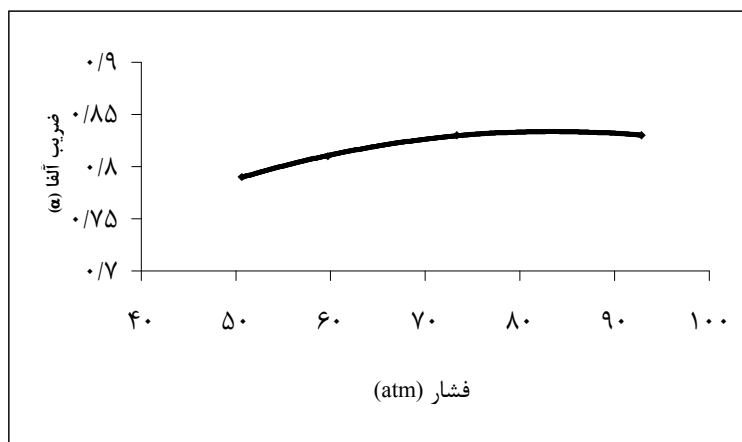
شکل ۱۱- تغییرات اندازه قطره برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۴/۴ میلیمتر



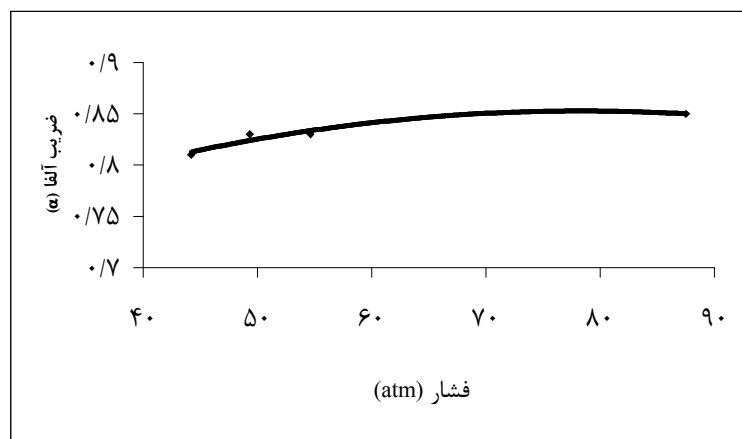
شکل ۱۲- تغییرات مقدار α برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۳/۲ میلیمتر



شکل ۱۳- تغییرات مقدار α برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۳/۴ میلیمتر



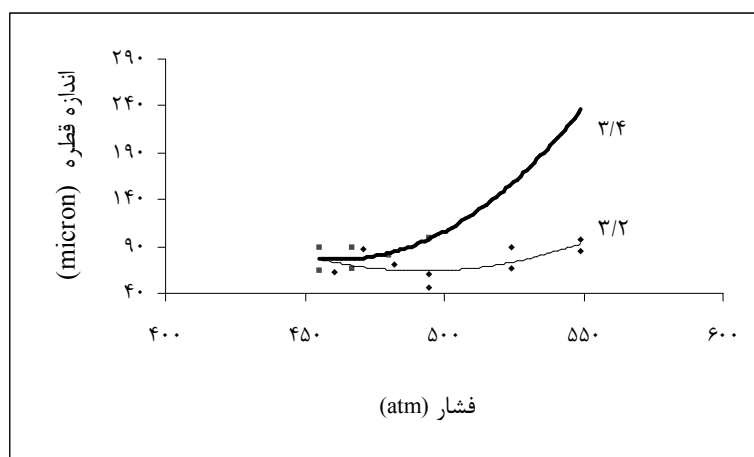
شکل ۱۴- تغییرات مقدار α برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۴/۲ میلیمتر



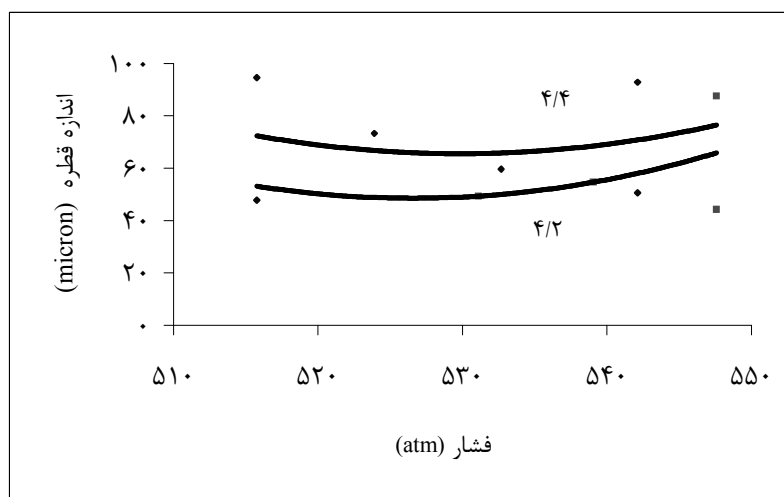
شکل ۱۵- تغییرات مقدار α برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۴/۴ میلیمتر

کلیه فشارها افزایش قطر قطره را در پی خواهد داشت (شکل ۱۷).
با توجه به شکل‌های (۱۸ و ۱۹) می‌توان دید که به ازای فشار یکسان، شیپورهایی با قطر بیشتر مقدار α بزرگتری ایجاد می‌کنند که این به معنی تولید محصول با کیفیت مطلوب‌تر خواهد بود.

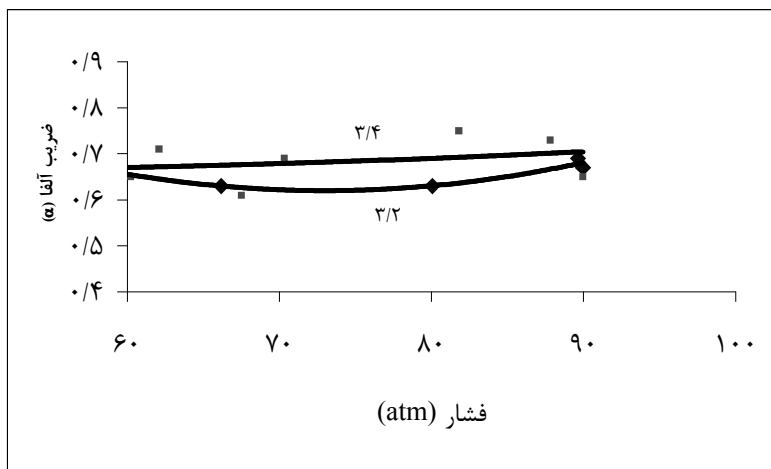
شکل (۱۶) نشان می‌دهد که برای شیپوره‌های با قطر کمتر (با قطر ۳/۲ و ۳/۴ میلیمتر) در فشارهای پائین‌تر (حدود ۴۵۰ اتمسفر) تأثیر قطر شیپوره در اندازه قطره قابل ملاحظه نیست ولی با افزایش فشار، نقش قطر شیپوره قابل ملاحظه خواهد بود. در مورد شیپوره‌های با قطر بزرگتر (۴/۲ و ۴/۴ میلیمتر) می‌توان گفت که افزایش قطر در



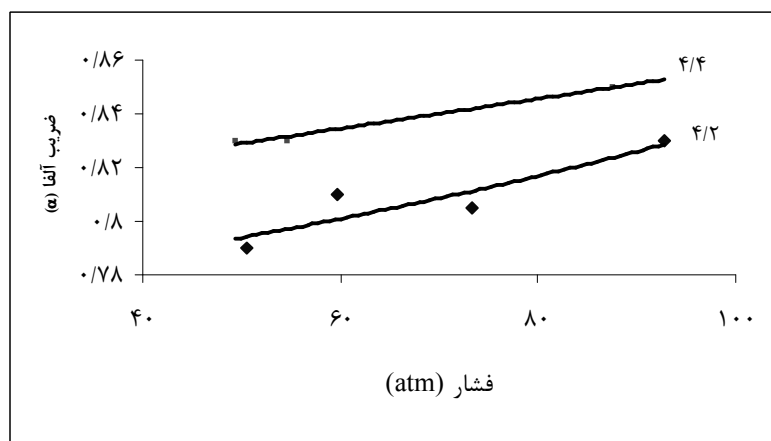
شکل ۱۶- تغییرات اندازه قطره برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۳/۲ و ۳/۴ میلیمتر



شکل ۱۷- تغییرات اندازه قطره برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۴/۲ و ۴/۴ میلیمتر



شکل ۱۸- تغییرات مقدار α برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۳/۴ و ۳/۲ میلیمتر



شکل ۱۹- تغییرات مقدار α برحسب فشار برای شیپوره با قطر ۴/۴ و ۴/۲ میلیمتر

نتیجه گیری

کیفیت محصول (افزایش تخلخل) گردد اگرچه این افزایش در فشارهای بسیار بالا خیلی محسوس نخواهد بود.

نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در یک خشک‌کن پاششی صنعتی، افزایش فشار شیپوره می‌تواند در دو محدوده متفاوت سبب کاهش یا افزایش قطر قطرات اسپری شده گردد. از آنجایی که کاهش قطر قطره می‌تواند به تخلخل بیشتر ذرات پودر تولید شده و در نتیجه افزایش کیفیت محصول منجر شود، استفاده از شیپوره در محدوده فشارهایی که سبب کاهش قطر قطره می‌گردد (حدود ۸۰ اتمسفر) توصیه می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزایش قطر شیپوره در محدوده فشار توصیه شده می‌تواند سبب افزایش

جدول علائم اختصاری

d_c	قطر معادل مغزی هوا، in.
d	قطر اوریفیس شیپوره، in.
PA	افت فشار در طول شیپوره، psi
ρ	دانسیتته، gt/cc
C_D	ضریب تخلیه، بدون بعد

- [7] Kufferath A., wende B., Leuckel W., "Influence of liquid flow conditions on spray characteristics of internal-mixing twin-fluid atomizers", *Int. J. of Heat & Fluid Flow*, vol 20, 513-519, oct (1999).
- [8] Hino T., et al., "Development of a new type nozzle and spray drier for industrial production of fine powders", *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, vol 49, 79-85, (2000).
- [9] Dumouchel D., et al., "Viscous flow in a swirl atomizer", *Chemical Engineering Science*, vol 48, 81-87, Jan (1993).
- [10] Hewitt J. A., "Droplet size spectra produced by air assisted atomizers", *Journal of Aerosol Science*, vol 24, 155-162, March (1993).
- [11] Elversson J., et al., "Droplet and particle size relationship and shell thickness of inhalable lactose particles during spray drying", *Journal of Pharmaceutical Science*, vol 92, 900-910, Jan (2003).
- [12] Lavernia J. E., wu Y., *Spray atomization and deposition*, John Wiley & Sons Inc., (1996).
- [13] Matsumotos et al., *J. Chem. Eng. Jpn.* vol 7, no1, 13-19, (1974).
- [14] Marshall W. R., "Atomization and spray drying", *Chemical Engineering Progress monograph series No.2*, American Institute of Chemical Engineers, New York, (1954).
- [15] Singer A. R. E., Roche D. L., *Powder metall.*, vol 23, 673-682, (1980).
- [16] Mitchell J. P., Stone R. L., *J. Phys.*, vol 15, 565-569, 1982.
- [17] Mao P. C., Tate R., "Sprays", *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, vol 22, John Wiley & Sons, New York, (2004).
- شدت جریان حجمی، gpm Q
- سطح مقطع محفظه خوراک، in² A
- شعاع سطح مقطع محفظه خوراک، in R
- سرعت محوری متوسط خوراک، m/sec V_a
- سرعت مماسی متوسط سیال خوراک در هنگام خروج از شیپوره، m/sec V_t

مراجع

- [1] sirignano A.W., *Fluid dynamics and transport of droplets and sprays*, Cambridge University Press, (1999).
- [2] Reinhold M., Horst C., Hoffmann U., "Experimental and theoretical investigation of a spray dryer with simultaneous chemical reaction", *Chem.Eng.Sci.*, vol 56, 1657-1665, (2001).
- [3] Davidson S.A., Milwidsky B., *Synthetic detergent*, 7th ed., Longman Sc & Tech., (1987).
- [4] Master K., *Spray drying handbook*, 4th ed., John Wiley & Sons Inc., (1985).
- [5] Arpe J.H., *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, vol B₂, 5th ed., Wiley-VCH, (1996).
- [6] Dombrowski N., Hasson D., "The flow characteristics of swirl (centrifugal) spray pressure nozzles with low viscosity liquids", *AIChE Journal*, vol 15, 604-611, June (2004).