

# Effective Parameters of the Aluminum Particles Cyclone Separator in the Effervescent Fuel

J.VaziriNaeenNejad<sup>1</sup>, F. Ommi<sup>2</sup> and H. Moosavi<sup>3</sup>

1, 2 and 3. Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University

\*Postal Code: 14115-143, Tehran, IRAN

**fommi@modares.ac.ir**

*The addition of proper-sized metal particles to the effervescent fuels increases the density of exhaust gases from rocket engines and the trust consequently. On the other hand, the addition of non-optimized metal particles causes combustion instability. Thus, the separation of proper-sized metal particles is under consideration here. In this study, among different methods of separating the aluminum particles in the fuel, the performance of the conic cyclone separator has been studied and the numerical results are validated by the experimental data. With a specific particle diameter and speed, the less the angle between the cyclone body and the horizon, the higher would be the separation efficiency. In addition, for increasing the separation efficiency of aluminum particle, it is recommended to build the inlet section of cyclone at the lower point of cyclone body.*

**Keywords:** Cyclone, Separation, Turbulent flow, Two phase, Effervescent fuel

---

1.M. Sc. Student

2.Associate Professor (Corresponding Author)

3.PhD

# بررسی پارامترهای مؤثر بر سیکلون جداکننده ذرات آلومینیوم موجود در سوخت‌های جوشان

جواد وزیری نایین نژاد<sup>۱</sup>، فتح‌اله امی<sup>۲\*</sup> و سیدحسین موسوی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران، کد پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

fommi@modares.ac.ir

افزودن ذرات فلزی با قطر بهینه به سوخت‌های جوشان موجب افزایش چگالی گازهای خروجی از دهانه موتور و در نهایت افزایش تراست سیستم می‌شود. از سوی دیگر، در صورت بهینه نبودن قطر ذرات افزوده، ناپایداری احتراق ایجاد می‌شود. از این رو جداسازی ذرات با قطر مناسب اهمیت بالایی دارد. در این پژوهش از میان روش‌های مختلف جداسازی ذرات آلومینیوم موجود در سوخت به بررسی عملکرد جداکننده سیکلونی مخروطی شکل، پرداخته شده است به این منظور ابتدا شبکه‌بندی سیکلون با روش‌های مناسبی انجام می‌شود و سپس نتایج عددی با آزمایشات گزارش شده در مقالات صحه‌گذاری می‌شود. با بررسی اثرات قطر، سرعت ذره و زاویه شیب می‌توان دریافت که در یک قطر و سرعت ذره مشخص، با کمتر کردن شیب سیکلون یعنی زاویه بدنه آن با افق، بازده جداسازی افزایش می‌یابد. همچنین هرچه مقطع ورودی ذرات آلومینیوم به سیکلون در نقطه پایین‌تری از بدنه سیکلون ساخته شود، بازده جداسازی بیشتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: سیکلون، جداسازی، جریان آشفته، دوفازی، سوخت جوشان

$V_{TS}$

سرعت نشست ذرات

$C_D$

ضریب درگ

$u_F$

مؤلفه نوسانی سرعت

## مقدمه

در صنایع، جداسازی ذرات فازهای گوناگون از یکدیگر بسیار مورد نظر است. به عنوان مثال تلاش‌های بسیاری برای بهبود جداسازی ذرات فاز پراکنده<sup>۴</sup> (اغلب فاز جامد و گاهی نیز فاز مایع) از فاز پیوسته<sup>۵</sup> (سیال) در حال انجام است.

برای این مقصود روش‌های مختلفی وجود دارد که هر کدام می‌تواند ذرات با ویژگی‌های خاص را از یکدیگر جدا کند. یکی از این روش‌ها استفاده از دستگاهی است که بر مبنای تفاوت نیروی

## علائم و اختصارات

$\tau_{ij}(x, t)$

تانسور تنش‌های ویسکوز

$\tau_{ij}^R$

تانسور تنش رینولدز

$d_p$

قطر ذرات

$\bar{u}_r$

مؤلفه متوسط‌گیری شده زمانی سرعت

$v_p$

سرعت ذرات

$\eta$

بازده جمع‌آوری ذرات

$F_C$

نیروی گریز از مرکز

$F_{DG}$

نیروی درگ

$\rho_p$

چگالی ذرات

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد

۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۳. دکتری

4. Discrete phase

5. Continuous phase

اقتصادی کافی به علت بازده بالا در جداسازی و ... [۵]. از جمله **معایب** سیکلون می‌توان به جمع‌شدن رسوبات در دیواره‌ها و همچنین ظرفیت محدود در ورود ذرات سنگین اشاره کرد که با ملاحظاتی بر طرف می‌شود.

به‌منظور طرحی جامع از سیکلون‌ها، همواره تلاش می‌شود تا بیانگر این موضوع باشد که هر سیکلون با مشخصات هندسی خاص، چه ذراتی با چه قطر، سرعت و جنسی را می‌تواند تفکیک کند. هدف عمده این مطالعه، بهینه‌سازی سیکلون است که منجر به افزایش توان جداکنندگی ذرات می‌شود.

بعضی از سیکلون‌ها که با ذرات درشت‌تر کار می‌کنند - قطر ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر - علاوه بر این که باید طوری طراحی شوند تا بازده جمع‌آوری ذرات بالایی را داشته باشند، باید دارای ظرفیت ورود دبی بالایی از ذرات نیز باشند تا استفاده از آن‌ها صرفه اقتصادی لازم را داشته باشد [۶].

بررسی سابقه طرح سیکلون نشان می‌دهد، اولین اطلاعات در زمینه اختراع سیکلون مربوط به فینچ در سال ۱۸۸۵ در آمریکا است. وی در این سال اولین طرح یا اختراع مربوط به سیکلون را ثبت کرد [۷]. اما شاید مهم‌ترین اثر را در این حوزه بتوان مربوط به استیرمند و دانشجویش لاپل دانست که فرمول‌هایی کاربردی برای طراحی ارائه کردند. به طوری که هم اکنون نیز بسیاری از طراحی‌های صنعتی از این مدل استفاده می‌کنند. تلاش‌های این دو در سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۵۰ منجر به طراحی سیکلون‌های کلاسیک<sup>۶</sup> و روابطی ارائه شد که نشان می‌داد سیکلون‌های کلاسیک در مقایسه با سایر سیکلون‌ها در قطر ذره و سرعت ورودی متفاوت بیش‌ترین بازدهی را دارند [۵].

اسلاک و همکارانش، سال ۲۰۰۰ به مش‌بندی بی‌ساختار و سه بعدی سیکلون با هر دو مدل تنش‌های رینولدز و مدل گردابه بزرگ ادی<sup>۷</sup> و مقایسه نتایج با سرعت‌سنج فازی داپلر پرداختند [۸]. ونگ و همکارانش سال ۲۰۰۶، روابطی تحلیلی برای تعداد دور مؤثر ذره در گردابه‌های داخل سیکلون ارائه کردند و به بررسی عوامل مؤثر بر افت فشار سیکلون پرداختند [۹]. در واقع آن‌ها تأکید داشتند که با افزایش قطر و سرعت پاشش ذرات، افت فشار افزایش می‌یابد.

چو و همکاران در سال ۲۰۰۹، روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی را برای دنبال کردن ذره با دیدگاه لاگرانژی در سیکلون‌های غلظت متوسط<sup>۸</sup> بررسی کردند [۶].

اینرسی کار می‌کند و معمولاً به‌منظور جداسازی ذرات با قطر ۵۰-۵ میکرومتر استفاده می‌شود به طوری که در این بازه، کارایی حداکثری خواهد داشت؛ این دستگاه جداکننده ذرات سیکلونی نام دارد [۱].

نحوه عملکرد سیکلون به این صورت است که بر اثر چرخش سیال در داخل سیکلون، دو گردابه اولیه و ثانویه ایجاد می‌شود. گردابه اولیه که ابعاد بزرگتری نیز دارد، می‌تواند ذرات معلق درشت‌تر را با خود همراه کند و به دلیل محدود بودن عرض سیکلون باعث برخورد ذرات با دیواره سیکلون می‌شود. در سطح دیواره به علت وجود اصطکاک، سرعت گاز کم می‌شود و مواد در اطراف دیواره در یک جریان با سرعت کم به دام می‌افتند و تحت تأثیر جاذبه به سمت ته سیکلون می‌روند. مطابق نظریه آشپز، انرژی، انرژی جنبشی ورودی به جریان، از طریق گردابه‌هایی با مقیاس‌های بزرگ‌تر، به گردابه‌های با مقیاس کوچک‌تر یا کولموگورو انتقال یافته و تلف می‌شود [۲]. لذا، گردابه ثانویه که ابعاد کوچک‌تری نیز دارد تنها می‌تواند ذرات سبک و ریز را با خود همراه کند. یعنی ذرات ریزتر به همراه گردابه ثانویه واقع بر هسته مرکزی سیکلون را از طریق مجرای بالایی طی مسیری مارپیچ به بیرون می‌فرستد [۳].

امروزه، در بسیاری از صنایع از جمله: صنایع پتروشیمی، معادن (برای تولید زغال‌سنگ با توزیع یکسان)، صنایع غذایی (به عنوان مثال نشاسته با قطر خاص)، تکنولوژی نانو (جداسازی ذرات درشت-تر از مقیاس نانو)، کارخانجات سیمان و تصفیه‌خانه‌های آب برای جداکردن شن و سنگ از آب، نیاز به جداسازی ذرات با قطر و جنس مختلف احساس می‌شود.

یکی از این کاربردها که در این پژوهش مورد نظر است، در صنایع هوافضا و در زمینه سوخت‌های جوشان راکتی است. برای ایجاد سرعت و حرکت در سیال عامل به انرژی نیاز است هر چه چگالی انرژی (انرژی بر واحد حجم) بیشتر باشد سرعت حرکت سیال بیشتر می‌شود و در نهایت نیروی رانش افزایش می‌یابد. در سوخت‌های راکتی و در موتورهای هیبریدی که گرین سوخت آن‌ها ترکیبات فلزی دارد [۴] به‌منظور افزایش نیروی تراست، افزودن ذرات چگال، مانند آلومینیوم با توزیع قطر یکنواخت کمتر از ۵۰ میکرومتر مورد نیاز است؛ لذا استفاده از جداکننده‌های سیکلونی، پیش از تزریق ذرات آلومینیوم به سوخت‌های جوشان می‌تواند راهگشا باشد.

اهمیت استفاده وسیع از سیکلون را با مقایسه مزایا و معایب آن می‌توان به راحتی توجیه کرد. برخی مزایای استفاده از سیکلون عبارتند از: عدم وجود قطعه متحرک که هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری را بسیار کاهش می‌دهد، توانایی کارکرد در شرایط دشوار مانند دما و فشار بالا و در تماس با مواد خورنده در شرایطی که سیکلون از جنس مناسبی ساخته‌شود، فرایند ساده ساخت، صرفه

6. Classic Cyclone Design (CCD)

7. Eddy

8. Dense Medium Cyclone (DMC)

حرکت سیال ندارد، بنابراین می‌توان حرکت هر کدام از فازها را به صورت جداگانه بررسی کرد. یعنی ابتدا بدون در نظر گرفتن حضور ذرات فاز پراکنده، حرکت سیال مدل می‌شود؛ سپس با استفاده از این نتایج، نیروهای وارد بر ذره از طرف سیال به دست می‌آید و فاز پراکنده شبیه‌سازی می‌شود [۱۵].

از میان مدل‌های مختلف موجود برای شبیه‌سازی جریان دو فاز، مدل دو فاز اولرین- لاگرانژی انتخاب شده است. مدل اولرین، فاز پیوسته یعنی هوا را در نظر می‌گیرد و به معنای حل معادلات بقا با دیدگاه انتگرالی در کل حوزه حل است. در این دیدگاه معادلات در کل حوزه یعنی هندسه سیکلون حل می‌شوند و توزیع سرعت، فشار و ... در تک تک نقاط به دست می‌آیند. معادلات حاکم بر جداکننده سیکلونی ذرات با توجه به نوع هندسه نوشته می‌شود [۷].

معادله پیوستگی را می‌توان به فرم رابطه (۱) نمایش داد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

معادله (۲) نیز در سه جهت برای مومنتوم برقرار است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)}{\partial x_j} \quad (2)$$

که  $u_i(x, t)$  مؤلفه  $i$ ام سرعت سیال در فضا و زمان،  $P(x, t)$  فشار استاتیکی،  $\tau_{ij}(x, t)$  تنش‌های ویسکوز معادله (۳)،  $\tau_{ij}^R$  تانسور تنش رینولدز معادله (۴) و  $\rho(x, t)$  چگالی جریان است.

$$\tau_{ij} = \vartheta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{ij}^R = \overline{u_i u_j} \quad (4)$$

که  $\overline{u_i u_j}$  مؤلفه متوسط‌گیری شده زمانی است.

دنبال کردن ذرات جامد با دیدگاه لاگرانژی انجام می‌شود. به این منظور ابتدا فاز سیال با دیدگاه اولرین حل می‌شود، سپس معادله لاگرانژی که معادله‌ای دیفرانسیلی و در واقع موازنه نیرویی ذره است، حل می‌شود تا مکان و پارامترهای مجهول ذرات معین شود. در دیدگاه لاگرانژی برخلاف دیدگاه اولرین به جای بررسی کل حوزه حل، دستگاه مختصات به همراه ذره حرکت می‌کند و تغییرات ناشی از ذره را بر حوزه حل اعمال می‌کند. به بیان ساده‌تر در دیدگاه لاگرانژی، از دستگاه مختصات متحرک استفاده می‌شود و فرض شده است این دستگاه همراه ذره در حرکت است [۱۶].

فرضیات شبیه‌سازی حرکت ذرات به شرح زیر است [۳]:

- مؤلفه مماسی سرعت جریان برابر مؤلفه مماسی سرعت ذرات است یعنی ذرات در جهت مماسی شتاب ندارند.

- سرعت نسبی بین جریان هوا و ذرات موجب بهم ریختن الگوی جریان نمی‌شود.

مهدی آزادی و همکاران در سال ۲۰۱۰، اثر هندسه سیکلون بر پارامترهای عملکردی مانند افت فشار و بازدهی را بررسی کردند [۱۰] که در نتیجه آن مشخص شد، با افزایش ارتفاع سیکلون، بازده جداسازی افزایش و افت فشار کاهش می‌یابد.

وینس و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بهینه‌سازی سیکلون‌های چگالی متوسط پرداختند تا بتوانند دبی کافی از ذرات درشت‌تر را وارد سیکلون کنند [۱۱]، که در نتیجه آن مشخص شد، سیکلون‌های بلندتر بازده بیشتر و سیکلون‌های عریض‌تر گنجایش بیشتری دارند. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۴، توسط ژیانگ و همکارانش منتشر شد، شش سیکلون با آرایش متفاوت برای استوانه خروج (ورتکس فایندر) به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی حاکی از آن است که بازده سیکلونی که ورتکس فایندر آن مخروطی شکل است بیشتر از سیکلونی است که مقطع خروجی استوانه‌ای شکل دارد. همچنین سیکلون با مقطع خروجی شیاردار نسبت به سیکلون با پروفیل خروج مخروطی شکل، دارای ۲۷ درصد افت فشار کم‌تر و ۹ درصد بازدهی بیشتر است [۱۲].

در پژوهش جامع‌تری که در سال ۲۰۱۵ توسط هسیائو و همکارانش منتشر شده است، اثرات مقاطع ورود و خروج و همچنین هندسه بخش مخروطی سیکلون بررسی شده است. طبق این بررسی نتایج به شرح زیر است: هرچه بخش مخروطی سیکلون کوتاه‌تر اما عریض‌تر باشد، سیکلون بهینه‌تر است. برای داشتن بازدهی بیشتر باید مقطع ورودی را بزرگ‌تر و مقطع خروجی را کوچک‌تر ساخت تا جایی که افت فشار زیاد نشود. نبود بخش مخروطی سیکلون یا جایگزینی آن با سازه استوانه‌ای شکل موجب کاهش بازدهی می‌شود [۱۳].

در تحقیقی که توسط سانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ انجام شده است؛ طول گردابه تشکیل شده به روش‌های عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، شدت جریان چرخشی در جهت محوری و به سمت ته سیکلون تقلیل می‌یابد و سرعت مماسی و محوری نیز به تدریج در این جهت کاهش می‌یابد. همچنین انرژی جنبشی جریان در سیکلون به هر دو جهت شعاعی و محوری منتقل می‌شود و این اتلاف انرژی است که باعث کم شدن شدت جریان در سیکلون می‌شود. در این راستا معادله‌ای برای طول گردابه طبیعی نیز برحسب هندسه و شدت جریان چرخشی ارائه شده است [۱۴].

## معادلات حاکم

غلظت حجمی ذرات جامد معلق، نسبت به فاز پیوسته گاز حامل، بسیار کم است، بنابراین حرکت ذرات جامد تأثیر چشمگیری بر روی

جداسازی ذرات بسیار ریز در مقایسه با نیروهای دیگر از نیروی وزن صرف نظر می‌شود. در رابطه (۹) تعادل نیروی وزن و درگ دیده می‌شود:

$$F_{DG} = F_g = mg \quad (۹)$$

که در آن  $F_{DG}$ ، نیروی درگ است و از قانون استوکس یعنی رابطه (۵) به دست می‌آید. از این تعادل می‌توان سرعت نشست را که در آن ذره به تعادل نیرویی و سرعت حد می‌رسد در قالب رابطه (۱۰) نوشت:

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g}{18\mu} \quad (۱۰)$$

(د) نیروی اینرسی:

برخورد ذرات فازها با یکدیگر یا با دیوارهٔ سیکلون باعث ایجاد نیروی اینرسی می‌شود؛ افزایش این نیرو باعث اتلاف انرژی جنبشی و افت فشار می‌شود که منجر به کاهش بازده جداسازی ذرات می‌شود.

معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر ذرات جامد با دیدگاه لاگرانژی به صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) و با در نظر گرفتن چهار نیروی بالا بیان می‌شود [۱۸]:

$$\frac{du_p}{dt} = -F_D[u_p - u_F - \dot{u}_F] - g(\sin\theta) \quad (۱۱)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{w_p^2}{r_p} - F_D[v_p - v_F - \dot{v}_F] - (g\cos\theta) \quad (۱۲)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = -\frac{v_p \cdot w_p}{r_p} - F_D[w_p - w_F - \dot{w}_F] \quad (۱۳)$$

که در آن مؤلفه‌های سرعت ذره با اندیس  $P$ ، مؤلفه‌های سرعت سیال با اندیس  $f$  و مؤلفه‌های نوسانی سرعت سیال  $\dot{u}_F$ ،  $\dot{v}_F$  و  $\dot{w}_F$  هستند.  $r_p$  نیز قطر ذره است. همچنین در سیکلون‌های با زاویهٔ  $\theta$  با افق، در عبارت نیروی گرانش، عبارات داخل پرانتز در معادلات (۱۱ و ۱۲) حضور دارند. عبارت اول در سمت راست روابط (۱۲ و ۱۳) نیروی گریز از مرکز است.

نیروی درگ براساس سرعت نسبی میان جریان هوا و ذرات مطابق رابطه (۶) ایجاد می‌شود که برای ضریب درگ از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

نیروی تراسنت در پیشران‌ها از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{T} = \dot{m}\mathbf{V} + \mathbf{A}_e(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_a) \quad (۱۴)$$

که در آن  $\dot{m}$  چگالی سوخت،  $V$  سرعت خروج گازها از دهانه،  $A_e$  مقطع دهانهٔ خروجی و  $P_e$  فشار دهانهٔ خروج و  $P_a$  فشار محیط است.

ذرات فاز پراکنده تأثیری بر یکدیگر ندارند یعنی از نیروی اینرسی حاصل از برخورد ذرات به دلیل کم بودن قطر ذرات صرف نظر می‌شود.

ذره کروی در نظر گرفته می‌شود. برای ذرات نامنظم و غیرکروی، قطر معادل آیرودینامیکی (قطر استوکس) استفاده می‌شود. نیروهای وارد بر فاز پراکنده عبارتند از:

(الف) نیروی درگ:

از آنجا که فیزیک مسئله با قطر ذرات کوچکی سروکار دارد، عدد رینولدز معمولاً بسیار پایین بوده و جریان خزشی است. لذا از تئوری استوکس برای به دست آوردن نیروی درگ استفاده می‌شود. به این منظور با کوپل معادلات پیوستگی و مومنوم و نوشتن به فرم بی‌بعد شده، نیروی درگ به شکل رابطه (۵) تعیین می‌شود و برای اعداد رینولدز کمتر از یک برقرار است.

$$F_{DG} = 3\pi\mu V_{TS} d_p \quad (۵)$$

در رابطه (۵)،  $\mu$  ویسکوزیتهٔ ذرات،  $d_p$  قطر ذرات و  $V_{TS}$  سرعت نشست ذرات است که در ادامه معرفی می‌شود.

برای به دست آوردن نیروی درگ در سایر اعداد رینولدز تلاش‌های زیادی انجام شده است که مهم‌ترین آن رابطه (۶) است [۱۷].

$$F_{drag} = \frac{\pi}{8} C_D \rho d_p^2 \quad (۶)$$

که در آن  $\rho$  چگالی ذرات است و ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز از رابطهٔ تجربی (۷) تعیین می‌شود:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 0.1 \\ \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{3}{16} Re + \frac{9}{160} Re^2 \ln 2Re \right) & 0.1 < Re < 2 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 2 < Re < 500 \\ 0.44 & 500 < Re < 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (۷)$$

(ب) نیروی گریز از مرکز:

یکی از تأثیرگذارترین نیروها در این نوع جداسازی فازها، نیروی گریز از مرکز است که در جهت شعاعی بر ذره اعمال می‌شود و با معادله (۸) بیان می‌شود:

$$F_C = ma_r = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \left[ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \quad (۸)$$

(ج) نیروی وزن:

در سیکلون‌هایی که وظیفهٔ جداسازی ذرات چگال‌تر را بر عهده دارند نیروی وزن نقش مهمی ایفا می‌کند و بر عکس در

جدول ۱- اندازه بخش‌های سیکلون

$Z_c$	$L_c$	$H_c$	$De$	$J_c$	$B_c$	
۱۲۵	۸۵	۲۵	۷۵	۱۰	۱۲/۵	ابعاد (mm)

گردابه اول در مخروط ناقص، ذرات معلق درشت را به سمت دیواره می‌فرستد و تحت تأثیر جاذبه در انتهای سیکلون به دام می‌افتند. گردابه ثانویه، ذرات سبک و ریز را به همراه هوا از طریق مجرای بالایی یعنی استوانه کوچک داخلی طی مسیری مارپیچ به بیرون می‌فرستد. در این پژوهش از روش هیبرید برای تولید شبکه استفاده شده است؛ یعنی بعضی بخش‌های هندسه به خصوص نزدیک دیواره از مش ساختاریافته و در نقاط دور از دیواره از مش غیرساختاری استفاده شده است.

الف) تمام سطوحی که یک طرف آن مش زده شده شرط عدم لغزش دارند با این توضیح که برای سطح جانبی استوانه داخلی خروجی هر دو طرف آن مش زده می‌شود باید جداگانه دیوار انتخاب شود.

ب) برای سطح دایره‌ای پایینی و کوچک‌تر مخروط ناقص سیکلون از شرط مرزی دیواره و نوع به دام‌انداز<sup>۹</sup> استفاده می‌شود تا ذرات در این سطح جمع‌آوری شوند.

ج) ورودی جریان مستطیلی شکل و خروجی از طریق استوانه کوچک داخلی انجام می‌شود.

شکل (۲) شماتیکی از شرایط مرزی فاز گسسته و پیوسته را در سیکلون شیب‌دار نشان می‌دهد.

انتخاب الگوهای گسسته‌سازی<sup>۱۰</sup> تأثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی دارد. انسیس فلونت، حلگرهای بسیاری برای الگوهای گسسته‌سازی مختلف، کوپل فشار- سرعت، فشار، مومنتوم، انرژی جنبشی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی پیشنهاد می‌دهد. در مراجع الگوی گسسته‌سازی سیمپل<sup>۱۱</sup> برای کوپل فشار- سرعت استفاده شده است که موجب همگرایی بهتری می‌شود. برای گسسته‌سازی فشار نیز از الگوی میان‌یابی پرستو<sup>۱۲</sup> استفاده شده است که تنها الگویی است که با دقت می‌تواند پروفیل سرعت میانگین، توزیع فشار استاتیک و افت فشار در سیکلون‌ها را با انطباق خوبی نسبت به داده‌های تجربی پیش‌بینی کند. کاربرد این الگوی حل مطابق دستورالعمل انسیس فلونت در جریان‌های چرخشی است. برای گسسته‌سازی مومنتوم از الگوی کوئیک<sup>۱۳</sup> استفاده می‌شود.

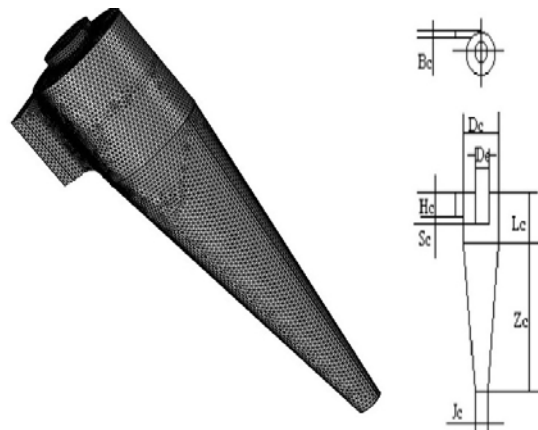
افزودن ذرات چگالی مانند پودر آلومینیوم، موجب افزایش دبی جرمی، افزایش سرعت خروجی گازها از دهانه و در نتیجه افزایش نیروی تراست می‌شود.

شایان ذکر است که در راستای شعاعی استوانه خروجی، تنها دو نیروی گریز از مرکز و درگ به ذرات وارد می‌شود که تعادل این نیروها اساس کار سیکلون را رقم می‌زند یعنی اگر نیروی درگ بیشتر از نیروی گریز از مرکز باشد ذره در گردابه اولیه به دام می‌افتد و شانس کمتری برای برخورد با دیواره‌ها و جداسازی دارد. اگر این دو نیرو برابر باشند ذرات بر اساس توزیع آماری، شانس برابری برای تفکیک یا خروج از سیکلون دارند و اگر نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تر از نیروی درگ باشد ذره به سمت دیواره‌ها پرتاب شده و به راحتی جمع‌آوری می‌شود [۳].

در بررسی حاضر، نوعی سیکلون کلاسیک بر اساس مدل لاپل مورد تحلیل عددی قرار می‌گیرد و با انتخاب الگوی مناسب گسسته‌سازی معادلات و مدل مناسب آشفستگی، نتایج گزارش می‌شود. در ادامه تحقیق در عملیات، استقلال از تعداد مش‌ها انجام و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی، اعتبارسنجی می‌شود. در انتها نیز بهینه‌سازی زاویه شیب سیکلون گزارش می‌شود.

## شرایط مرزی و حل عددی

مطابق شکل (۱) سیکلونی با ابعاد جدول (۱) با نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده است. ابتدا سیال و ذرات شن از ورودی مکعب مستطیل شکل وارد می‌شود و بر اثر چرخش سیال، حول استوانه بزرگ خارجی، دو گردابه اولیه و ثانویه ایجاد می‌شود.



شکل ۱- هندسه و شبکه‌بندی سیکلون

9. Wall trap  
 10. Discretization scheme  
 11. Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE)  
 12. Pressures Taggering Option (PRESTO)  
 13. Quadratic Upwind Differencing (QUICK)

متوسط‌گیری زمانی<sup>۱۹</sup> معادله ناویر- استوکس با این فرض صحیح هستند که آشفتگی همگن<sup>۲۰</sup> باشد، یعنی در تمام جهات انتشار آشفتگی یکنواخت است، اما این مسئله مطابق با فیزیک جریان در هیدروسیکلون‌ها نیست. لذا مدل آشفتگی باید همزمان معادلات انتقال برای هر تنش رینولدز و معادلات نرخ اتلاف را حل کند که در جریان سه بعدی منجر به هفت معادله اضافی می‌شود [۲۰].

**جدول ۲-** بازده جمع‌آوری ذره آلومینیوم با قطر ۵ میکرومتر و سرعت پاشش ۱۵ متر بر ثانیه در مدل‌های مختلف آشفتگی

مدل توربولانسی	تعداد ذرات پاشش شده	تعداد ذرات فرار کرده	تعداد ذرات جمع‌آوری شده	بازده جمع‌آوری ذرات (درصد)
RSM	۱۵۰	۱۴	۱۳۶	۹۰/۶
RNG	۱۵۰	۱۹	۱۳۱	۸۷/۳
k-ε-standard	۱۵۰	۴۶	۱۰۴	۶۹/۳
k-w-SST	۱۵۰	۱۷	۱۳۳	۸۸/۶

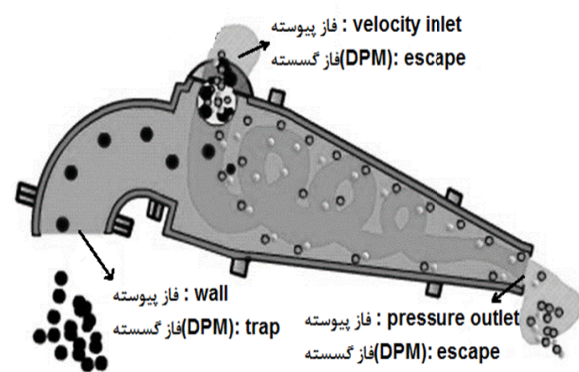
## استقلال از شبکه‌بندی و اعتبارسنجی

برای آنکه یک حل عددی نتایجی منطبق بر واقعیت داشته باشد باید تست استقلال از شبکه<sup>۲۱</sup> بر روی نتایج انجام گیرد. همچنین به منظور صحت‌گذاری<sup>۲۲</sup>، نتایج حل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. در کار آزمایشگاهی که قبلاً انجام گرفته بازدهی که برای سیکلون مدل 1D3D، با ذره خاکستر اندازه‌گیری شده برابر ۹۶/۷ درصد است [۲۱].

مطابق جدول (۳) در این مدل‌سازی عددی، در هر مرحله تعداد شبکه‌بندی تقریباً دو برابر شده است به طوری که بار دوم بازده ۹۰ درصد، بار سوم با دو برابر شدن تعداد شبکه‌بندی بازدهی ۹۳ درصد و بار چهارم مجدداً تعداد شبکه‌بندی‌ها دو برابر می‌شود و بازدهی حدود ۹۸ درصد است، که دلیل اختلاف می‌تواند کیفیت کمتر شبکه‌بندی در مقاطع باشد. یعنی احتمالاً تعداد شبکه‌بندی ورودی و سیلندر درونی مکش سیکلون و دیواره به دام انداختن ذره یعنی مخروط ناقص به یک نسبت مناسب شبکه‌بندی زده نشده است. برای شبکه‌بندی سوم علت بیشتر شدن بازدهی، زیادبودن تعداد شبکه‌بندی و خطای انباشت<sup>۲۳</sup> یا غیرمعتبر شدن فرض کسر حجمی کم است.

گسسته‌سازی انرژی جنبشی و اتلاف توربولانس از الگوی مرتبه دو بالادست<sup>۱۴</sup> است. از الگوی گسسته‌سازی مرتبه اول بالادست<sup>۱۵</sup> برای معادلات تنش‌های رینولدز استفاده می‌شود [۱۹].

گسسته‌سازی معادلات از هر دو روش مرتبه اول بالادست<sup>۱۶</sup> و مرتبه دوم انجام شده است. الگوی گسسته‌سازی<sup>۱۷</sup> مرتبه اول با تعداد ۱۸۰۰ تکرار به دقت همگرایی معادل مرتبه<sup>۱۸</sup> ۱۰<sup>-۶</sup> می‌رسد. به نظر می‌رسد دمپینگ به واسطه نفوذ عددی<sup>۱۸</sup> که در حل با الگوی مرتبه اول حاصل می‌شود تأثیر مثبتی در سرعت همگرایی حل ایجاد کرده است. بنابراین اسکیم مرتبه اول برای حل انتخاب می‌شود.



**شکل ۲-** شرایط مرزی فاز پیوسته و گسسته در سیکلون شیب‌دار

مهم‌ترین پارامتر کنترل کیفیت عملکرد سیکلون بازده جمع‌آوری ذرات است که مطابق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود [۶]:

$$\eta = 1 - \frac{n_{\text{escaped}}}{n_{\text{trapped}}} \quad (15)$$

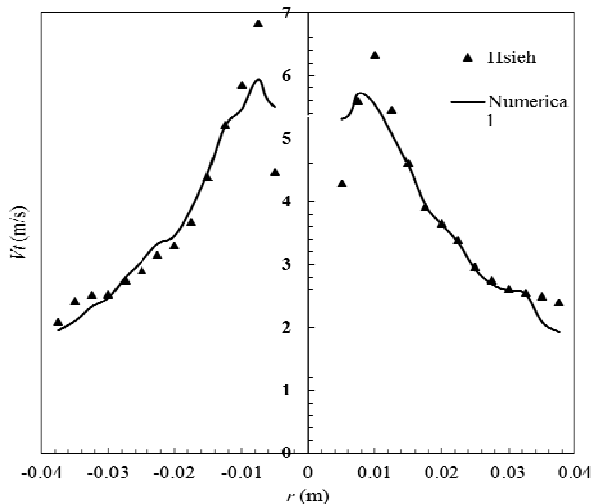
$n_{\text{trapped}}$  تعداد کل ذرات آلومینیوم تزریق شده و  $n_{\text{trapped}}$  تعداد ذرات جمع‌آوری شده در مقطع پایینی سیکلون است. ذراتی که از مقطع بالایی یعنی استوانه کوچک خارج می‌شوند در واقع فرار کرده‌اند و با  $n_{\text{escaped}}$  نشان داده می‌شوند.

مدل SST ترکیب مدل کا- اپسیلون در خارج از لایه مرزی و مدل کا- امگا در نزدیک دیواره است. این دو مدل توسط یک تابع ترکیبی به معادلات آشفتگی افزوده می‌شود [۱۹]. به منظور انتخاب مدل مناسب آشفتگی، چهار مدل RSM, SST-k-w, RNG-k-ε و مدل استاندارد به کار گرفته شده است. مدل SST-k-w همانند مدل RSM به راحتی گردابه‌های اولیه و ثانویه را ایجاد می‌کند. مطابق جدول (۲) مدل RSM به عنوان مدل آشفتگی بهینه در شبیه‌سازی سیکلون شیب‌دار انتخاب شده است. از آنجا که سایر مدل‌های

19. RANS  
20. Isotropic  
21. Grid independency  
22. Validation  
23. Round of error

14. Second-Order Upwind  
15. First-Order Upwind  
16. First order upwind  
17. Scheme  
18. Numerical diffusion

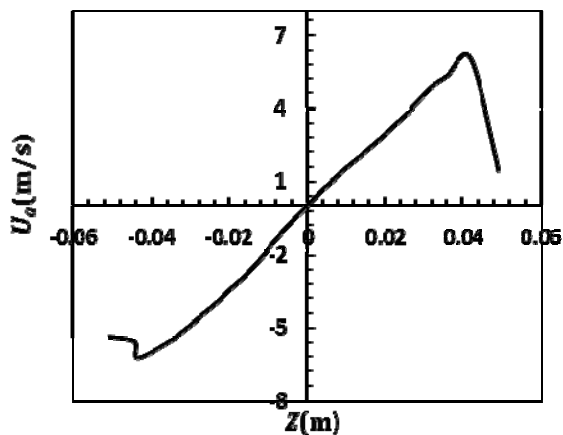
در کاربردهای جداسازی ذرات چگال‌تر یا ذرات با قطر بیشتر-  $0.50$  تا  $10$  میلی‌متر- وزن نقش مهمی در معادلات تعادل نیرویی ایفا می‌کند و قابل صرف‌نظر کردن نیست. شیب‌دار ساختن سیکلون‌ها در واقع باعث ایجاد مؤلفه در نیروها و به‌خصوص نیروی وزن می‌شود. می‌توان زاویه شیب بدنه سیکلون با افق را طوری در نظر گرفت که ذرات تمایل بیشتری برای برخورد با دیواره و به دام افتادن در گردابه‌های بزرگ‌تر داشته باشند.



شکل ۳- مقایسه نتایج سرعت مماسی حاصل از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی هسیه در طول موقعیت‌های شعاعی سیکلون

### نتایج و بحث

برای سیکلون‌های قائم از نوع 1D3D نمودار سرعت محوری روی خطی گذرنده از مقطع خروجی سیکلون در شکل (۵) رسم شده است.



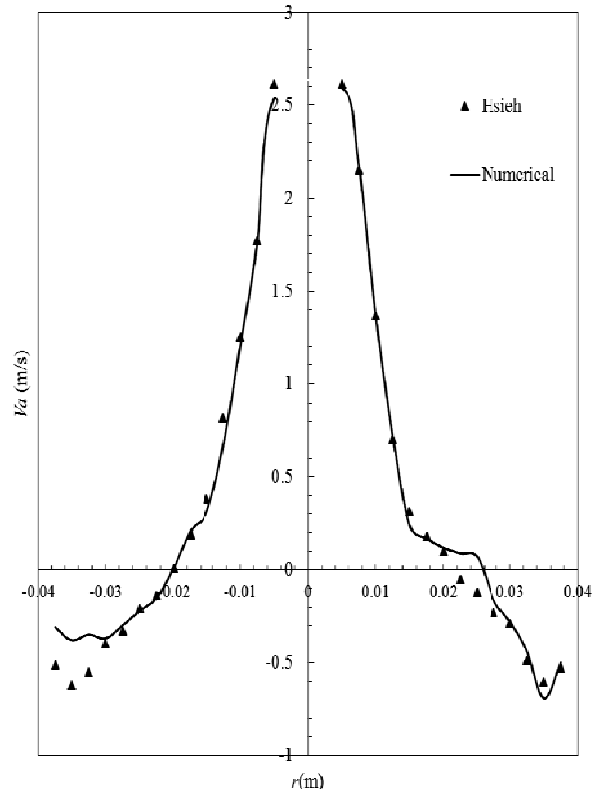
شکل ۴- پروفیل سرعت محوری روی خط گذرنده از مقطع عرضی خروج سیکلون

این تغییرات بیانگر گردابه‌های رانکین هستند که در سرعت‌های پاشش بالاتر، تغییرات با وضوح بالاتری قابل مشاهده

### جدول ۳- استقلال از شبکه‌بندی و مقایسه با نتایج تجربی

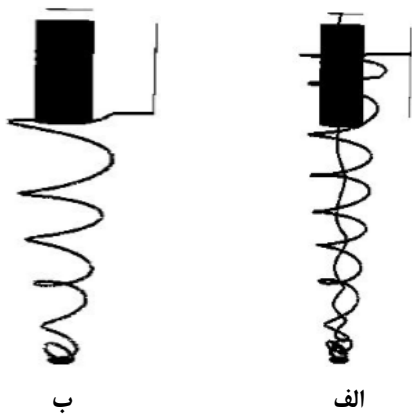
تعداد شبکه‌بندی	بازده جداسازی (درصد)	خطا با حالت آزمایشگاهی (درصد)
۱۵۶۲۱۷	۷۳/۸	۲۲/۹
۳۰۴۰۱۹	۸۹/۶۷	۶/۹۷
۵۷۰۸۹۲	۹۳/۴	۳/۲
۱۱۳۲۱۴۷	۹۸/۸۷	۲/۱۷

اختلاف درصد بازده برای تعداد شبکه‌بندی‌های مختلف کمتر از  $10$  درصد و میزان خطا و انحراف از حالت آزمایشگاهی حدود  $10$  درصد است. بنابراین اعتبارسنجی و استقلال از شبکه‌بندی، صحت‌گذاری می‌شود. برای اطمینان از صحت حل عددی فاز پیوسته، نتایج پروفیل سرعت محوری و مماسی برحسب موقعیت شعاعی در فاصله  $60$  میلی‌متر از بالای سیکلون به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی از اندازه‌گیری سرعت‌سنج داپلر فازی توسط هسیه به‌دست آمده است [۲۲]. نتایج حل عددی در هر دو نمودار سرعت محوری و مماسی در موقعیت شعاعی‌های بیشتر از  $0.1$  متر تطابق مناسبی دارد، اما برای موقعیت شعاعی بین  $0.1$  و  $0.05$  متر که محدوده هسته جریان سیال است و نزدیک دیواره‌ها، مقدار خطا افزایش می‌یابد.



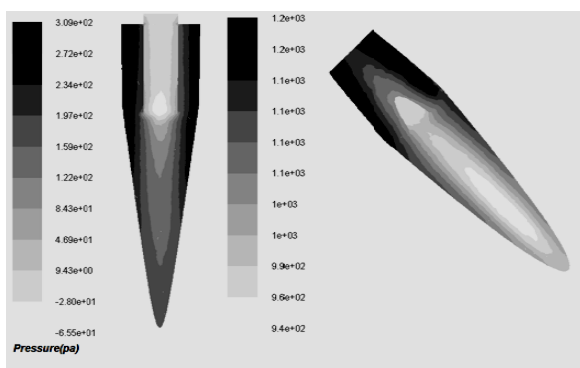
شکل ۵- مقایسه نتایج سرعت محوری حاصل از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی هسیه در طول موقعیت‌های شعاعی سیکلون





شکل ۷- مقایسه وضعیت دو ذره که از نیمه بالا و نیمه پایین مقطع ورودی پاشش شده است.

در شکل (۸) توزیع فشار بر روی صفحه‌ای گذرنده از هسته مرکزی سیکلون قائم و شیب‌دار مشاهده می‌شود. افت فشار برای سیکلون قائم در ورودی استوانه خروج (ورتکس فایندر) رخ می‌دهد اما برای سیکلون شیب‌دار در ناحیه مرکزی بخش مخروطی اتفاق می‌افتد و باعث می‌شود ذرات به این ناحیه کشیده شوند و از مقطع بالایی فرار کنند. افت فشار عاملی منفی در کارکرد سیکلون به حساب می‌آید چرا که انرژی جنبشی را که توسط جرم و سرعت پاشش ذرات به وجود می‌آید کم می‌کند. اثر این افت فشار بر ذرات ریزتر مشهودتر است، به طوری که با اعمال نیرویی رو به بالا باعث می‌شود ذرات ریزتر که انرژی جنبشی کمتری دارند از مقطع بالا خارج شوند یعنی موجب کاهش راندمان سیکلون می‌شود. در سرعت ورودی ۲۰ متر بر ثانیه، افت فشار در سیکلون قائم ۲۰۴۳/۴۴ و در سیکلون شیب‌دار ۴۷۷/۹۴ پاسکال است. این مقدار افت فشار در زوایای شیب مختلف با افق تقریباً یکسان است.

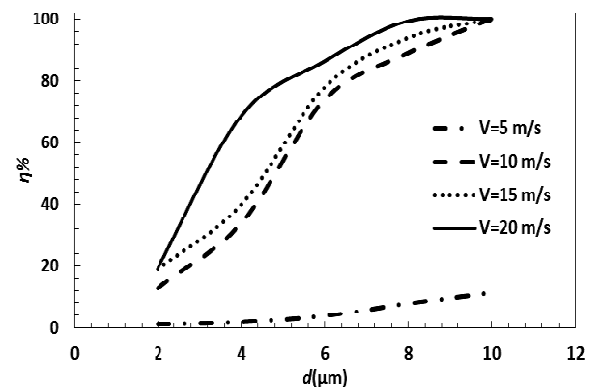


شکل ۸- مقایسه ناحیه افت فشار در سیکلون شیب‌دار و قائم

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در کاربردهای جداسازی ذرات چگال‌تر یا ذرات با قطر زیاد- ۰/۵۰ تا ۱۰ میلی‌متر- وزن نقش

خواهد بود. این گردابه‌ها نشان می‌دهد حل جریان به درستی انجام شده است چرا که گردابه‌های اولیه و ثانویه تشکیل شده‌اند و در جهت‌های مخالف هم در حال گردش هستند. با وجود اینکه هیچ قطعه گردنده و متحرکی در سیکلون وجود ندارد این گردابه‌ها تشکیل می‌شوند که بیانگر توسعه یافتگی جریان داخل سیکلون است. در این گردابه‌ها، هسته به صورت دوران جسم صلب حرکت می‌کند و در فواصل دورتر از هسته، جریان غیرچرخشی است.

در سیکلون‌های قائم نیروی وزن تنها در یک جهت اثرگذار است. با بررسی شکل (۶) می‌توان دریافت با افزایش قطر، سرعت و چگالی ذرات پاشش شده، بازده جمع‌آوری ذرات زیاد می‌شود که علت آن افزایش نیروی گریز از مرکز در نتیجه افزایش جرم، سرعت و چگالی است.

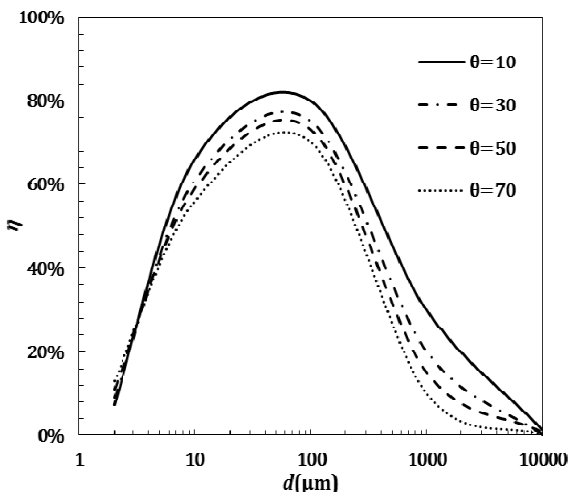


شکل ۶- تغییرات بازده جمع‌آوری سیکلون برحسب چگالی ذرات در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و برای قطر ذره ۵ میکرومتر

نتیجه مهم دیگر، بررسی محل پاشش ذرات از مقطع ورودی و تأثیر آن بر بازده جداسازی است. در واقع تفاوت در مختصات محل پاشش باعث می‌شود ذرات با تعداد دوره‌های گوناگون گردش کنند و طول مؤثری که ذرات در گردابه‌های داخلی و خارجی طی می‌کند متفاوت باشد. مطابق شکل (۷) ذراتی که از نیمه بالایی ورودی تزریق می‌شوند شانس فرار به بیرون بیشتری دارند (شکل سمت راست) به این دلیل که ذره تمایل دارد با گردابه‌های کوچک در نزدیکی هسته مرکزی سیکلون حرکت کند و بالعکس ذراتی که از نیمه پایینی ورودی تزریق می‌شوند شانس به دام افتادن آن‌ها بیشتر است (شکل سمت چپ) به این خاطر که ذره تمایل به دیواره‌هاست و با گردابه‌های بزرگ حرکت می‌کند و در نهایت برخلاف حالت قبل شانس جدا شدن بیشتری دارد. بنابراین در کاربردهای صنعتی بهتر است مقطع ورودی سیکلون تا حد امکان پایین‌تر ساخته شود.

میکرون، عملکرد سیکلون قائم بهتر از سیکلون شیب‌دار است و هر چه قطر ذرات افزایش یابد، بازده جمع‌آوری ذرات ابتدا افزایش می‌یابد به طوری که بیشینه بازدهی در قطر ذرات در حدود ۱۰۰ میکرومتر رخ می‌دهد و سپس دچار کاهش می‌شود که برای ذرات درشت، بازدهی به صفر میل می‌کند و این یعنی هیچ ذره درشتی در مقطع پایینی مخروطی شکل سیکلون به دام نمی‌افتد و ذرات در حال به دام افتادن در مقطع بالایی سیکلون هستند. شایان ذکر است که قطر بهینه ذرات، مستقل از زاویه شیب بوده و در تمام زوایا، یکسان است با این تفاوت که هر چه زاویه شیب کاهش یابد، بازده جمع‌آوری ذرات در قطر ذره یکسان بیشتر خواهد شد.

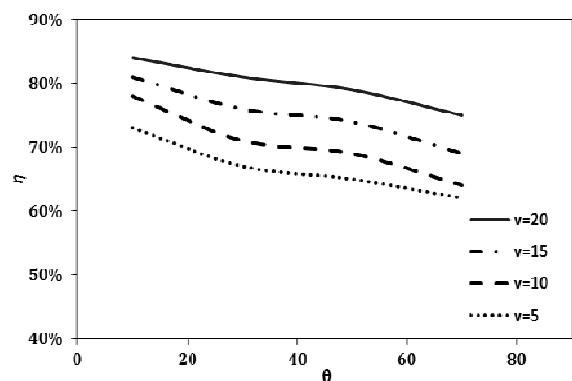
اما علت دو نتیجه حاصل از شکل‌های (۹) و (۱۰) آن است که مؤلفه کسینوسی نیروی وزن در زاویه‌های شیب کوچک سیکلون، مقدار بیشتری دارد و این یعنی ذرات شانس بیشتری برای گردش به همراه گردابه‌های اولیه و در نتیجه برخورد با دیواره دارند که این موضوع به دام افتادن ذرات در مقطع پایینی و مخروطی شکل سیکلون را تسهیل می‌کند. اما با افزایش زاویه شیب، مؤلفه افقی نیروی وزن کم شده و شانس کمتری برای برخورد ذرات با دیواره وجود دارد که موجب کاهش بازده جمع‌آوری ذرات می‌شود که از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. در این وضعیت، کاربری سیکلون عوض می‌شود یعنی ذرات تمایل به جداسدن از مقطع بالایی سیکلون دارند و برای بازدهی باید تعریف جدیدی ارائه کرد.



شکل ۱۰- تغییرات بازده جمع‌آوری سیکلون برحسب قطر ذرات در زاویه‌های شیب مختلف و سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

در شکل (۱۱) مسیر حرکت تعدادی ذره در سیکلونی با زاویه ۳۰ درجه با افق دیده می‌شود.

مهمی در معادلات ایفا می‌کند و قابل صرف‌نظر کردن نیست. شیب‌دار ساختن سیکلون‌ها در واقع باعث ایجاد مؤلفه در نیروها و به خصوص نیروی وزن می‌شود. می‌توان زاویه شیب بدنه سیکلون با افق ( $\theta$ ) مطابق شکل (۹) را طوری در نظر گرفت که ذرات تمایل بیشتری برای برخورد با دیواره و به دام افتادن در گردابه‌های بزرگ‌تر داشته باشند. به این منظور برای یک قطر ذره خاص، تغییرات بازده جمع‌آوری ذرات بر حسب زاویه‌های مختلف بدنه سیکلون با افق ( $\theta$ ) در شکل (۹) و در چهار سرعت پاشش متفاوت رسم شده است و از آن برداشت می‌شود که هر چه زاویه سیکلون با افق کاهش یابد، بازده جمع‌آوری ذرات افزایش می‌یابد. این زاویه بهینه مستقل از سرعت پاشش بوده و در تمام سرعت‌ها یکسان است با این تفاوت که هر چه سرعت بالاتر رود، بازده جمع‌آوری ذرات در زوایای شیب یکسان، بیشتر خواهد شد. شایان ذکر است که اگرچه بیشینه بازده جمع‌آوری ذرات در زاویه ۱۰ درجه حاصل می‌شود یعنی تعداد ذرات کمتری در این زاویه فرار می‌کنند، اما بعضی ذرات وضعیت نامحتملی<sup>۲۴</sup> دارند، یعنی در داخل سیکلون همچنان در حال حرکت هستند و انباشت می‌شوند که باعث ایجاد رسوب شده و در عملکرد سیکلون‌خلل وارد می‌کند. بنابراین در کاربردهای صنعتی باید اندکی زاویه شیب را بیشتر انتخاب کرد تا از انباشت ذرات در سیکلون جلوگیری شود و ذره با سهولت خارج شود. لذا زاویه‌ای بین ۱۰ تا ۳۰ درجه با افق به عنوان زاویه شیب بهینه پیشنهاد می‌شود.

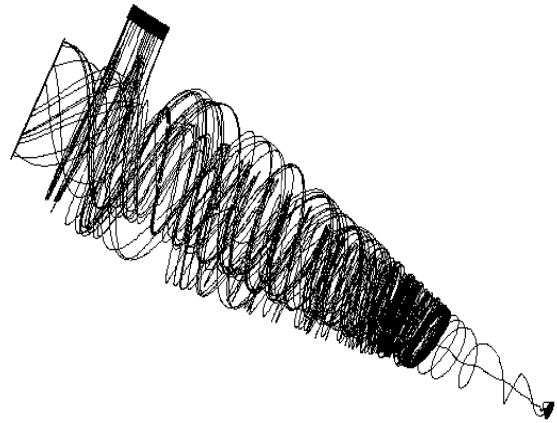


شکل ۹- تغییرات بازده جمع‌آوری برحسب زاویه شیب سیکلون با افق در سرعت‌های مختلف و برای ذره با قطر ۱۰۰ میکرومتر

برای بررسی اثر قطر ذرات بر بازده جداسازی آن‌ها در سیکلون‌های شیب‌دار، شکل (۱۰) در چهار زاویه شیب مختلف رسم شده است که نتیجه می‌شود برای قطر ذرات کمتر از ۱۰

شانس کمتری برای برخورد ذرات با دیواره وجود دارد که موجب کاهش بازده جمع‌آوری ذرات می‌شود. در این وضعیت، کاربریسیکلون عوض می‌شود یعنی ذرات تمایل به جداسدن از مقطع بالایی سیکلون دارند.

برای تزریق توزیعی یکنواخت از ذرات آلومینیوم درشت-با قطر ۱۰۰ میکرومتر- به سوخت‌های جوشان باید از سیکلون با زاویه شیب کم استفاده شود. و برای اینکه ذرات ریزتری-کمتر از ۵۰ میکرومتر- به سوخت وارد شود بایستی از سیکلون عمودی استفاده کرد. چرا که تفاوت بازده جداسازی ذرات در سیکلون‌های شیب‌دار، در قطر ذرات ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر مشهود است.



شکل ۱۱- مسیر حرکت تعدادی ذره در سیکلون شیب‌دار

## مراجع

- [1] Flagan, R.C. and Seinfeld, J.H., *Fundamental of Air Pollution Engineering*, Chapter 7: Removal of Particle from Gas Stream, California Institute of Technology, 2012, pp. 391-392,
- [2] Wilcox, D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, 2<sup>nd</sup> edition Los Angeles: DCW Industries, Inc, 1994.
- [3] Wang, L., *Theoretical Study of Cyclone Design*, (PhD Thesis), Graduated Studies of Texas A & M University, May 2004.
- [4] Ahangar, M. and Ebrahimi, E., "The Effect of Chemical Kinetics Modeling of Combustion of Gaseous Oxidizing on Solid Fuel," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, 2001, pp. 1-12.
- [5] Altmeyer, S., Mathieu, V., Jullemier, S., Contal, P., Midoux, N., Rode, S. and Leclerc, J.-P., "Comparison of Different Models of Cyclone Prediction Performance For various Operating Conditions using a General Software," *Chemical Engineering and Processing Journal*, Vol. 43, No. 4, 2004, pp. 511-522.
- [6] UMUCU, Y., "Investigation of Separation Performance of Dense Medium Cyclone using Computer Simulation," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 51, No. 1, 2015, pp. 303-314.
- [7] Slack, M.D., Prasad, R.O., Bakker, A. and Boysan, F., "Advances in Cyclone Modeling using Unstructured Grid," *Institution of Chemical Engineers*, Vol. 78, No. 8, 2000, pp.1098-1104.
- [8] Wang, L., Parnell, C.B., Shaw, B.W. and Lacey, R.E. "A Theoretical Approach for Predicting Number of Turns and Cyclone Pressure Drop," *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 49, No. 2, 2006, pp.491-503.
- [9] Chu, K.W., Wang, B., Yu, A.B. and Vince, A., "Modeling the Multiphase Flow in Dense Medium Cyclones," *7<sup>th</sup> International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Australia, 9-11 December 2009.
- [10] Azadi, M., Azadi, M. and Mohebbi, A., "A CFD Study of the Effect of Cyclone Size on its Performance Parameters," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 182, No.1-3, 2010, pp. 835-841.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جداسازی دو فازی گاز- جامد با استفاده از سیکلون مورد ارزیابی قرار گرفت. با معرفی معادلات حاکم و نیروهای وارد، تحلیل عددی انجام شد و نتایج مورد تست استقلال از تعداد گره شبکه قرار گرفت و با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌گذاری شد. با توجه به نتایج تحلیل، در کاربردهای صنعتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

در سیکلون‌های قائم، به دام‌اندازی و فیلتر ذرات از مقطع پایینی صورت می‌گیرد و با انتخاب سرعت پاشش مناسب (شکل ۶) حتی می‌توان ذراتی با قطر ۵ میکرومتر را نیز جداسازی کرد.

ذراتی که از نیمه بالایی ورودی تزریق می‌شوند مطابق شکل (۷) شانس فرار به بیرون بیشتری دارند به این دلیل که ذره تمایل دارد به همراه گردابه‌های کوچک در نزدیکی هسته مرکزی سیکلون حرکت کند و بالعکس ذراتی که از نیمه پایینی ورودی تزریق می‌شوند شانس به دام افتادن آن‌ها بیشتر است، به این دلیل که ذره متمایل به دیواره‌ها و حرکت در گردابه‌های بزرگ است و در نهایت برخلاف حالت قبل شانس جدا شدن بیشتری دارد. بنابراین بایستی پاشش ذرات از نیمه پایینی مقطع ورودی باشد.

مطابق شکل (۸) اگر سیکلون به صورت مایل قرار گیرد، یعنی بدنه آن با افق زاویه داشته باشد، افت فشار آن کمتر از سیکلون قائم است.

از شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان گفت برای ذرات آلومینیوم با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرومتر سیکلون قائم و برای ذرات با قطر بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرومتر سیکلون مایل مناسب‌تر است. طوری که سیکلون با زاویه ۱۰ درجه ذرات درشت‌تر را با افت فشار کمتر از مقطع بالا خارج می‌کند. همچنین سرعت ورودی‌های کمتر، بهتر از سرعت زیاد ورودی می‌تواند ذرات درشت را از مقطع بالایی سیکلون خارج کند. با افزایش زاویه شیب، مؤلفه افقی نیروی وزن کم شده و

- [17] Oh, J., Choi, S. and Kim, J., "Numerical Simulation of an Internal Flow Field in a Uniflow Cyclone Separator," *Powder Technology*, Vol. 274, 2015, pp. 135-145.
- [18] Shin, M., Kim, H. and Jang, D., "A Numerical and Experimental Study on a High Efficiency Cyclone Dust Separator for High Temperature and Pressurized Environments," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 1, 2005, pp. 1821-1835.
- [19] Menter, F.R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [20] Bagdi, P., Bhardwaj, P. and Sen, A.K., "Analysis and Simulation of a Micro Hydrocyclone Device for Particle Liquid Separation," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 134, No. 2, 2012, 9 pages.
- [21] Wang, L., Parnell, C.B., Shaw, B.W., "A Study of the Cyclone Fractional Efficiency Curves," *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Vol. 2, No. 1, 2002, pp. 1-14.
- [22] Brennan, M.S., Narasimha, M. and Holtham, P.N., "Multiphase Modelling of Hydrocyclones-Prediction of Cut-Size," *Minerals Engineering*, Vol. 20, No. 4, 2007, pp. 395-406.
- [11] Vince, A., Barnettc, G.D. and Barnett, P.J., "How to Optimize Design and Operation of Dense Medium Cyclones in Coal Preparation," *Minerals Engineering Journal*, Vol. 62, 2014, pp. 55-65.
- [12] Xiong, Z., Ji, Z. and Wu, X., "Development of a Cyclone Separator with High Efficiency and Low Pressure Drop in Axial Inlet Cyclones," *Journal of Powder Technology*, Vol. 253, No. 1, 2014, pp. 644-649.
- [13] Hsiao, T.Ch., Huang, Sh.H. Hsu, Ch.W., Chen, Ch. Ch. "Effects of the Geometric Configuration on Cyclone Performance," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 86, No. 1, 2015, pp. 1-12.
- [14] Li, X., Song, J., Sun, G., Jia, M., Yan, C., Yang, Z., Wei, Y., "Experimental Study on Natural Vortex Length in a Cyclone Separator," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Accepted Author Manuscript. doi:10.1002/cjce. 22598, 2016.
- [15] Umucu, Y., "Investigation of Separation Performance of Dense Medium Cyclone using Computer Simulation," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 51, No. 1, 2015, pp. 303-314.
- [16] Oh, J., Choi, S., Kim, J., "Numerical Simulation of an Internal Flow Field in a Uniflow Cyclone Separator," *Powder Technology*, Vol. 274, No. 1, 2015, pp. 135-145.