نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۹، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۹۷۱ تا ۱۹۸۸
DOI: 10.22060/mej.2022.20926.7341

طراحی الکتروسایکلون به کمک مدلسازی عددی به منظور جداسازی میکروذرات در محدوده اندازه معین

آرمین دارابی، علی مؤمنی موحد*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

خلاصه: سایکلون‌ها برای جداسازی ذرات بزرگتر از جریان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهش پیش رو با اعمال میدان الکتریکی در فاصله بین استوانه داخلی و خارجی سایکلون، امکان استفاده از آن برای جداسازی ذرات با جرم مشخص به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر هندسه و شدت میدان الکتریکی اعمال شده بر راندمان جداسازی و قطر ذرات جدا شده از جریان هواپخش ورودی به صورت کمّی ارائه شده‌اند. نتایج نشان داد که تغییر قطر استوانه‌های داخلی و خارجی سایکلون تأثیر کمی بر روی راندمان جداسازی ذرات خواهد داشت. این در حالی است که افزایش طول سایکلون، به خصوص طول استوانه داخلی تأثیر بسیار زیادی بر عملکرد الکتروسایکلون نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش زمان اعمال نیروی الکتریکی به ذرات در داخل سایکلون باشد. با توجه به فاکتور انحراف معیار هندسی در توزیع اندازه ذرات، نتایج نشان داد که دو برابر کردن طول استوانه داخلی سایکلون می‌تواند راندمان جداسازی ذرات را ۶٪ تا ۱۷٪ افزایش دهد. همچنین با تغییر دبی حجمی هواپخش ورودی به سایکلون و یا تغییر شدت میدان الکتریکی اعمال شده در داخل سایکلون، می‌توان اندازه‌های متفاوتی از ذرات را به وسیله الکترسایکلون از هواپخش جداسازی نمود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:
الکتروسایکلون
ذرات میکرونی
دوده
دسته‌بندی ذرات
جرم

۱- مقدمه

سایکلون‌ها تجهیزاتی هستند که به منظور حذف ذرات نسبتاً بزرگتر از جریان هواپخش[1] به کار گرفته می‌شوند. اساس کارکرد سایکلون‌ها بر مبنای نیروی گریز از مرکز بوده به این شکل که جریان هواپخش پس از ورود به سایکلون به واسطه هندسه آن در داخل سایکلون شروع به چرخش می‌کند و همزمان به طرف پایین آن حرکت کرده تا از خروجی که در میانه آن قرار گرفته است خارج شود. به این ترتیب به ذراتی که بزرگ‌تر و بالتبع سنگین‌ترند نیروی گریز از مرکز بیشتری وارد شده و این ذرات به سمت دیواره خارجی سایکلون حرکت کرده و به دیواره می‌چسبند، در حالیکه ذرات سبک‌تر جریان سیال را دنبال کرده و از سایکلون خارج می‌شوند.

مطالعات تئوری و آزمایشگاهی زیادی بر روی طراحی هندسی سایکلون‌ها به منظور بهبود عملکرد و افزایش راندمان آن‌ها صورت گرفته است. شیانگ[2] و همکاران [۱] در یک مطالعه تجربی، اثر سرعت ورودی و ابعاد بخش خروجی مخروطی شکل سایکلون را بر عملکرد آن مورد بررسی قرار دادند، بدین صورت که سه نوع سایکلون که تفاوت آنها در اندازه قطر خروجی بخش مخروطی آن است را با چهار سرعت ورودی مختلف برای هر طرح مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با کاهش اندازه قطر خروجی مخروط برای هر چهار سرعت ورودی بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد. اوسی[3] و کاراگز [۲] تأثیر چند پارامتر هندسی را به صورت تئوری بر عملکرد سایکلون بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع استوانه خروجی (ورتکس فایندر[4]) باعث کاهش افت فشار و افزایش بازدهی سایکلون می‌شود. شیانگ[5] و همکاران [۳] شش سایکلون با ورتکس فایندر مختلف را به شکل تجربی تحلیل کرده و نشان دادند که سایکلونی که ورتکس فایندر آن مخروطی شکل است از سایکلونی که مقطع خروجی آن استوانه‌ای شکل است بازدهی بیشتری دارد. در تحقیقی که توسط هسیائو[6] و همکاران [۴] به شکل آزمایشگاهی انجام شد، اثرات مقاطع ورودی و خروجی

1 Aerosol
2 Xiang
3 Avci
4 Vortex finder
5 Xiong
6 Hsiao

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: momenimovahed@eng.ikiu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

و بخش مخروطی شکل سایکلون مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که هر چه بخش مخروطی سایکلون کوتاه‌تر اما عریض‌تر باشد، سایکلون بهینه‌تر است. ایشان همچنین پیشنهاد کردند که برای بازدهی بیشتر، باید مقطع ورودی بزرگ‌تر و مقطع خروجی کوچک‌تر باشد. یائو[1] و همکاران [۵]، تأثیر طول مجرای ورودی سایکلون بر عملکرد آنرا بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش طول مجرای ورودی منجر به افزایش سرعت مماسی گاز در بدنه سایکلون می‌شود و اثر طول مجرای ورودی بر سرعت محوری کمتر از سرعت مماسی گاز است. همچنین نشان داده شد که افزایش طول مجرای ورودی هم افت فشار و هم راندمان جداسازی را کاهش می‌دهد. ونکاتش[2] و همکاران [۶] با کمک الگوریتم ژنتیک تأثیر پارامترهای هندسی همچون (ارتفاع کل سایکلون، طول و عرض دهانه ورودی و قطر خروجی) بر افت فشار سایکلون را تحلیل نموده و با استفاده از نتایج حاصل، به بهینه‌سازی سایکلون مربعی پرداختند. شاستری[3] و برار [۷] تأثیر تغییر نسبت ارتفاع سیلندر و مخروط بر عملکرد سایکلون را به صورت عددی مورد تحلیل قرار دادند. در این پژوهش هشت مدل مختلف سایکلون به گونه‌ای طراحی شده که نسبت بخش‌های استوانه‌ای و مخروطی به گونه‌ای تغییر کند که ارتفاع کل سایکلون ثابت بماند. نتایج نشان داد که افزایش طول سیلندر افت فشار را کاهش داده و افزایش طول مخروط باعث افزایش راندمان جمع‌آوری می‌شود. واسیلوسکی[4] و همکاران [۸]، به بررسی تجربی و عددی عملکرد سایکلون مربعی با پیکربندی‌های مختلف استوانه داخلی سایکلون پرداخته‌اند. در این پژوهش پنج قطر و سه طول مختلف برای استوانه داخلی در نظر گرفته شده است. تجزیه و تحلیل میدان جریان در داخل سایکلون با استفاده از سرعت‌سنجی تصویر ذرات استریوسکوپی[5] انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که استوانه داخلی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سایکلون دارد به گونه‌ای که با کاهش قطر استوانه داخلی راندمان جداسازی ۱۶ درصد افزایش یافته است.

بهبود سایکلون‌ها با تغییر بنیادین در ساختار آنها از دیگر موارد تحقیق بر روی آن‌ها بوده است. کیم[6] و همکاران [۹] برای اولین بار مطالعه‌ای تجربی بر روی سایکلون‌هایی با سطح بدنه اصلاح‌شده انجام دادند. آن‌ها بر روی سطوح بدنه این سایکلون‌ها شیارهایی در چند جهت مختلف ایجاد کردند. این شیارها به صورت مارپیچی، محیطی و عمودی در بدنه ایجاد شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که در دبی‌های پایین گاز، وجود شیارهای مارپیچ تا حدودی بازدهی جمع‌آوری ذرات را بهبود می‌بخشد، اما در دبی‌های بالا شیارهای مارپیچ تأثیر مهمی بر روی بازدهی جمع‌آوری ذرات ندارند. آن‌ها همچنین نشان دادند که وجود شیارهای محیطی و عمودی می‌توانند باعث کاهش بازدهی جمع‌آوری سایکلون‌ها شوند. ژائو[7] و همکاران [۱۰] سه سایکلون با ورودی مماسی، مارپیچ متقارن و متقارن همگرا شبیه‌سازی کردند تا اثر ورودی‌های متفاوت بر عملکرد سایکلون را مورد بررسی قرار دهند. نتایج آن‌ها نشان داد که ورودی مارپیچ متقارن باعث افزایش بازدهی نسبت به سایر انواع ورودی‌های بررسی شده می‌شود. واسیلوسکی و همکاران [۱۱]، میله‌ای در مرکز سایکلون قرار دادند و تأثیر ابعاد میله بر عملکرد سایکلون را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق سی سایکلون با قطر و طول میله مرکزی مختلف با روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از یک میله در مرکز سایکلون بازدهی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. مفرح و همکاران [۱۲] یک الکترود به یک سایکلون معمولی اضافه کرده و تأثیر آن بر عملکرد سایکلون را به صورت عددی مورد تحلیل قرار دادند. افزدن این الکترود در اصل باعث اعمال نیروی الکتریکی به ذرات می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ولتاژ الکترواستاتیک بالا باعث افزایش راندمان می‌شود و تأثیر آن بر ذرات ریزتر قابل توجه است.

حذف ذرات نسبتاً بزرگتر از جریان هواپخش بیشتر در کاربردهایی که در آن‌ها هدف، پاکسازی جریان هواپخش یا حداقل کاهش میزان ذرات موجود در گاز می‌باشد، مورد توجه قرار می‌گیرد. این در حالیست که در بعضی از کاربردها از قبیل صنایع داروسازی و پزشکی، صنایع غذایی و سایر کاربردهای صنعتی، جدا کردن ذرات با اندازه[8] و یا جرم مشخص از جریان هواپخش مورد نیاز است که در پژوهش حاضر به این موضوع پرداخته شده است. در این کاربردها در هواپخش مورد نظر ذراتی با اندازه‌های متنوع وجود دارند که لازم است این اندازه‌ها دسته‌بندی شده و ذرات در اندازه‌های گوناگون از یکدیگر جدا گردند. برای این منظور در یک دهه گذشته دستگاه‌هایی توسعه یافتند که عمل جداسازی ذرات با جرم مشخص را انجام می‌دهند. اهارا[9] [۱۳] برای اولین بار دستگاهی ابداع کرد که در ساختار آن از دو استوانه دوار با قطرهای نابرابر و با فاصله‌ای اندک از یکدیگر استفاده شده است.

1 Yao
2 Venkatesh
3 Shastri
4 Wasilewski
5 Stereo-PIV
6 Kim
7 Zhao
8 Size
9 Ehara

در فاصله بین این دو استوانه میدان الکتریکی اعمال شده و ذرات ورودی به این دستگاه قبل از ورود باردار می‌گردند. به این ترتیب به ذراتی که در فضای بین این دو استوانه قرار می‌گیرند دو نیرو که عبارتند از نیروی گریز از مرکز و نیروی الکتریکی در جهات مختلف وارد می‌شوند. ذراتی که این دو نیرو در آنها مساوی است، که از قضا جرم‌های یکسانی نیز دارند، از طرف دیگر این استوانه‌ها خارج می‌شوند. سایر ذرات بسته به این که کدام نیرو در آنها بیشتر است به سمت یکی از استوانه‌ها حرکت کرده و پس از برخورد به آن می‌چسبند. حال با تغییر شدت میدان الکتریکی و یا سرعت دورانی استوانه‌ها می‌توان ذرات در محدوده جرمی دیگری را جدا نمود. بنابراین این دستگاه به منظور طبقه‌بندی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. الفرت[1] و کولینگز [۱۴] با اعمال تغییر مختصری در نحوه عملکرد این دستگاه نشان دادند که اگر استوانه‌ها با سرعت متفاوتی بچرخند، راندمان جداسازی این دستگاه بالا رفته و ذرات بیشتری در محدوده جرمی مورد نظر از دستگاه خارج می‌شوند. علیرغم کارایی و دقت بسیار بالای دستگاه‌های توسعه یافته توسط اهارا [۱۳] و الفرت و کولینگز [۱۴]، به دلیل وجود قطعات متحرک در آن‌ها و بزرگ و سنگین بودن آن‌ها، استهلاک و تولید گرما در این دستگاه‌ها بالا بوده که بالتبع هزینه‌های بازدید دوره‌ای و تعمیر و نگهداری در آن‌ها را بسیار بالا می‌برد.

در پژوهش پیش رو امکان استفاده از نیروی الکتریکی همزمان با نیروی گریز از مرکز به منظور جداسازی ذرات در محدوده جرمی مشخص مشابه آنچه که در بالا اشاره شد با استفاده از سایکلون به صورت حل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در مرکز سایکلون میدان الکتریکی اعمال شده و مجدداً ذرات باردار ورودی به سایکلون تحت تأثیر دو نیروی گریز از مرکز و الکتریکی قرار می‌گیرند. در ذرات نسبتاً بزرگتر و سنگین‌تر نیروی گریز از مرکز بالاتر بوده و این ذرات به استوانه خارجی سایکلون خواهند چسبید. همچنین در ذرات نسبتاً کوچکتر و سبکتر نیروی الکتریکی نیروی غالب بوده و این ذرات نیز توسط استوانه داخلی سایکلون به دام افتاده و متوقف خواهند شد. بنابراین ذرات با محدوده جرمی مشخص که در آنها هر دو نیروی الکتریکی و گریز از مرکز مساوی است از سایکلون خارج خواهند شد. به دلیل حذف قطعات متحرک در این روش در مقایسه با روش توسعه یافته توسط اهارا [۱۳] و الفرت و کولینگز [۱۴]، هزینه جداسازی ذرات به مراتب پایین‌تر از تجهیزات اشاره شده در بالا خواهد بود.

به طور خلاصه نوآوریهای پژوهش حاضر را به صورت زیر می‌توان بر شمرد:

- استفاده از سایکلون برای اولین بار به منظور جداسازی ذرات در یک بازه‌ی اندازه‌ای خاص به کمک میدان الکتریکی
- کاهش هزینه‌های جداسازی ذرات
- کاهش هزینه‌های سرویس و نگهداری دستگاه جداساز
- جداسازی ذرات در اندازه‌های مختلف
- فراهم آوردن شرایطی برای استفاده از ذرات جدا شده با خواص فیزیکی مشخص

۲- هندسه طرح و معادلات حاکم بر مساله

۲- ۱- هندسه طرح

در این مطالعه، پنج سایکلون با ابعاد متفاوت به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. شکل ۱ هندسه سایکلون‌های مطالعه شده را نشان می‌دهد و ابعاد طرح‌های بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همانطور که از جدول ۱ بر می‌آید، در کلیه هندسه‌ها ابعاد بخش فوقانی استوانه‌ای شکل سایکلون تغییر کرده‌اند و قسمت مخروطی شکل دست نخورده باقی مانده است. در فضای بین استوانه داخلی سایکلون (ورتکس فایندر) و استوانه خارجی، میدان الکتریکی با شدت ۲۰-۳۰ kV/cm اعمال شده است. باید توجه داشت هر چه شدت میدان الکتریکی بالاتر رود، نیروی الکتریکی وارد شده به ذرات به خصوص ذرات کوچکتر بیشتر شده که این خود می‌تواند آزادی عمل بیشتری برای جداسازی ذرات کوچکتر ایجاد کند. از طرف دیگر افزایش شدت میدان الکتریکی به مقادیر بالاتر از ۳۰ kV/cm می‌تواند به آزاد شدن الکترون از اتمهای اکسیژن و نیتروژن موجود در هوا منجر شده که مطلوب نیست، لذا حداکثر میدان اعمال شده به ۳۰ kV/cm محدود شده است [۱۴]. ذرات همگی در مرکز بخش ورودی سایکلون تزریق می‌شوند و پس از طی کردن مسیر گردابی در فضای بین دو استوانه سایکلون، ذرات باقیمانده وارد بخش مخروطی پایین سایکلون شده و نهایتاً از بخش خروجی فوقانی[2] خارج می‌شوند. لازم به ذکر است که ذرات تزریق شده کربن سیاه (دوده) بوده و سیّالی که ذرات در آن تزریق می‌شود، هوا می‌باشد.

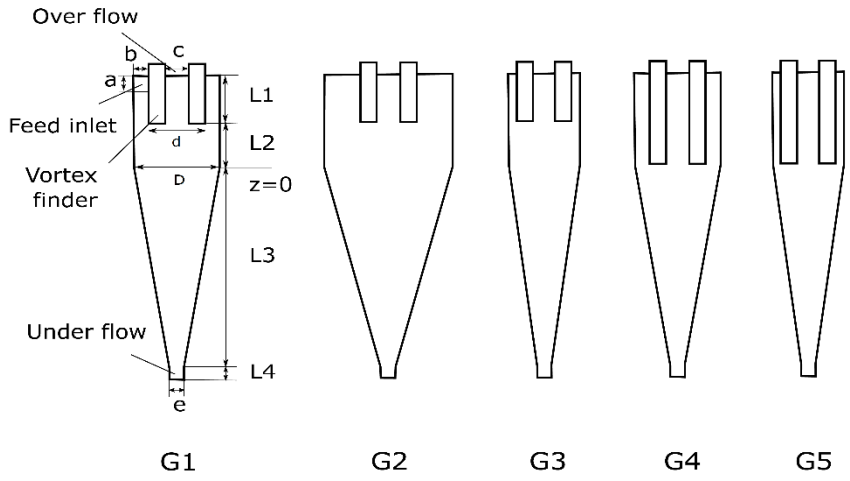
۲- ۲- معادلات حاکم بر مساله

کلیه مدلسازی‌ها به صورت سه‌بعدی و با جریان پایا انجام شده است. در کلیه حل‌های عددی فرضیاتی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

۱- دما بر حرکت ذرات تاثیری ندارد [۱۵].

1 Olfert

2 Over flow



شکل ۱. شماتیک هندسه سایکلون

Fig. 1. Schematic of cyclone geometries

جدول ۱. پارامترهای مشخصه طرحهای مطالعه شده. کلیه ابعاد به میلیمتر هستند.

Table 1. Specifications of the evaluated cyclones. Sizes are in mm.

ابعاد هندسی	$G۱$	$G۲$	$G۳$	$G۴$	$G۵$
a	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
b	۸	۲۰/۵	۴	۸	۴
c	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
d	۳۴	۳۴	۳۴	۳۴	۳۴
D	۵۰	۷۵	۴۲	۵۰	۴۲
e	۸	۸	۸	۸	۸
$L۱$	۳۶	۳۶	۳۶	۷۲	۷۲
$L۲$	۳۶	۳۶	۳۶	۰	۰
$L۳$	۱۵۹/۵	۱۵۹/۵	۱۵۹/۵	۱۵۹/۵	۱۵۹/۵
$L۴$	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

۲- غلظت ذرات به اندازه‌ای بالا نیست که نیروهای بین ذرات بر حرکت آنها تاثیری داشته باشد [۱۶].

۳- ذرات پس از برخورد با یکدیگر یکپارچه نمی‌شوند [۱۴].

۴- ذرات به صورت کروی در نظر گرفته شده‌اند [۱۶].

۵- ذرات پس از برخورد با دیواره، به دیوار می‌چسبند و از آن جدا نمی‌شوند [۱۴].

۶- در ورودی سایکلون، جریان هوا به شکل کاملاً توسعه یافته فرض شده است.

۷- دمای روی دیواره‌ها برابر دمای سیال در داخل سایکلون در نظر گرفته شده، بنابراین گرادیان دما بر روی دیواره و بالتبع انتقال گرما از دیواره صفر خواهد بود.

۸- دیواره داخلی سیلندر خارجی و دیواره خارجی سیلندر داخلی یا همان ورتکس فایندر به شکل تله[1] تعریف شده‌اند، لذا چنانچه ذره‌ای به دیواره برخورد کند به آن می‌چسبد و جدا نخواهد شد. دلیل این فرض وجود نیروهای چسبندگی شامل نیروی واندروالس[2]، نیروی الکترواستاتیک[3] و ... بین ذره و دیواره است [۱۷].

1 Trap
2 van der Waals force
3 Electrostatic force

۹- از لغزش سیال بر روی دیواره‌ها صرفنظر شده است.

۱۰- تنها نیروی وزن، گریز از مرکز و الکتریکی به ذرات وارد می‌شود و به دلیل غلظت ناچیز ذرات، از نیروهای بین ذره‌ای صرفنظر شده است.

معادله پیوستگی[1] [۱۸]:

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

که در آن u، v و w سرعت سیال در راستای x، y و z می‌باشد.

معادله مومنتوم[2] [۱۹] :

$$\rho\left(u_{\mathrm{j}}\frac{\partial u_{\mathrm{i}}}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right)=\frac{\partial p}{\partial x_{\mathrm{i}}}+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\mu\left(\frac{\partial u_{\mathrm{i}}}{\partial x_{\mathrm{j}}}+\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial x_{\mathrm{i}}}\right)-\rho u_{\mathrm{i}}u_{\mathrm{j}}\right]+\rho g_{\mathrm{i}} \qquad (۲)$$

که در آن p فشار، μ گرانروی[3] سیال و g شتاب جاذبه می‌باشد.

مدل جریان آشفته

نشان داده شده است که مدل تنش رینولدز می‌تواند جریان گردابه‌ای داخل سیکلون را مطابق با داده‌های تجربی به خوبی پیش‌بینی کند [۲۰]، لذا در این پژوهش از مدل تنش رینولدز، مطابق معادله (۳)، برای پیش‌بینی رفتار سیال استفاده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_{\mathrm{I}}'u_{\mathrm{J}}'}\right)+\frac{\partial}{\partial X_{\mathrm{k}}}\left(\rho U_{\mathrm{k}}\overline{u_{\mathrm{I}}'u_{\mathrm{J}}'}\right)=P_{\mathrm{ij}}+\varphi_{\mathrm{ij}}+D_{\mathrm{ij}}+\varepsilon_{\mathrm{ij}}+S \qquad (۳)$$

ترم‌های سمت راست معادله بالا به ترتیب از معادلات (۴) تا (۷) بدست می‌آیند [۲۱]:

$$P_{\mathrm{ij}}=-\rho\left[\overline{u_{\mathrm{I}}'u_{\mathrm{J}}'}\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial X_{\mathrm{k}}}+\overline{u_{\mathrm{J}}'u_{\mathrm{k}}'}\frac{\partial u_{\mathrm{i}}}{\partial X_{\mathrm{k}}}\right] \qquad (۴)$$

$$\varphi_{ij}=p\left(\overline{\frac{\partial u_{\mathrm{I}}'}{\partial X_{\mathrm{J}}}}+\overline{\frac{\partial u_{\mathrm{J}}'}{\partial X_{\mathrm{I}}}}\right) \qquad (۵)$$

$$D_{ij}=-\frac{\partial}{\partial X_{k}}[\rho\overline{u_{\mathrm{I}}'u_{\mathrm{J}}'u_{\mathrm{k}}'}+\overline{\left(p'u_{\mathrm{J}}'\right)}\delta_{\mathrm{ik}}+\overline{\left(p'u_{\mathrm{I}}'\right)}\delta_{\mathrm{jk}}-\mu\left(\frac{\partial}{\partial X_{\mathrm{k}}}\overline{u_{\mathrm{I}}'u_{\mathrm{J}}'}\right)] \qquad (۶)$$

$$\varepsilon_{\mathrm{ij}}=-2\mu\overline{\left(\frac{\partial u_{\mathrm{I}}'}{\partial X_{\mathrm{J}}}\frac{\partial u_{\mathrm{J}}'}{\partial X_{\mathrm{k}}}\right)} \qquad (۷)$$

معادلات حاکم بر فاز گسسته

در مدلسازی فاز گسسته[4]، برای ردیابی مسیر ذرات از روش لاگرانژی استفاده شده است.

$$\frac{\mathrm{D}u_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=F_{\mathrm{D}}\left(u-u_{\mathrm{p}}\right)+g\left(\frac{\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{L}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)+a_{\mathrm{x}} \qquad (۸)$$

در این رابطه u_p سرعت ذره، ρ_L چگالی سیال ، ρ_p چگالی ذره، a_x شتاب حاصل از نیروهای سطحی و F_D نیروی پسا[5] است [۲۲] که از رابطه (۹) بدست می‌آید:

$$F_{\mathrm{D}}=\left(\frac{18\mu}{\rho_{\mathrm{p}}D_{\mathrm{p}}^{2}}\right)\left(\frac{C_{\mathrm{D}}\,\mathrm{Re}}{24}\right) \qquad (۹)$$

در رابطه (۹)، Re عدد رینولدز[6] است که از رابطه زیر بدست می‌آید

1 Continuity equation
2 Momentum equation
3 Viscosity
4 Discrete Phase Model (DPM)
5 Drag Force
6 Reynolds Number

:[۲۳]

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho D_{\mathrm{p}}\left(u-u_{\mathrm{p}}\right)}{\mu} \qquad (۱۰)$$

همچنین C_D ضریب پسا[1] بوده که از رابطه (۱۱) قابل محاسبه می‌باشد :[۲۳]

$$C_D=\begin{cases}\dfrac{24}{\mathrm{Re}} & \mathrm{Re}\le 1\\ \dfrac{24\left(1+0.15\,\mathrm{Re}^{0.687}\right)}{\mathrm{Re}} & 1<\mathrm{Re}\le 1000\\ 0.44 & \mathrm{Re}>1000\end{cases} \qquad (۱۱)$$

تعداد بار ذرات

برای باردار کردن ذرات روش‌های مختلفی وجود دارد. ذرات بر اساس قطر و روش باردار کردن، تعداد بار مختلفی می‌پذیرند [۱۷]. از متداول‌ترین روش‌های باردار کردن ذرات می‌توان به باردار کردن به روش نفوذ[2]، و باردار کردن میدانی[3] اشاره کرد. در این پژوهش برای اطمینان از حداکثر بار دریافتی توسط ذرات از روش باردار کردن ترکیبی[4] که در واقع تلفیق همزمان هر دو روش قبلی است، استفاده شده است. در روش نفوذ، ذرات وارد محفظه‌ای که سرشار از الکترون یا یون است می‌شوند. حرکت تصادفی ذرات منجر به برخورد آنها با این الکترون‌ها و یا یون‌ها شده و ذرات باردار می‌شوند. روش میدانی کاملاً مشابه روش نفوذ بوده با این تفاوت که با ایجاد میدان قوی در محفظه حاوی ذرات و الکترون‌ها/یون‌ها، حرکت آن‌ها را بیشتر و همچنین جهت‌دار کرده و احتمال برخورد ذرات به آن‌ها افزایش می‌یابد. تعداد باری که ذرات به واسطه روش نفوذ و میدانی دریافت می‌کنند، به ترتیب از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود. بدیهی است که در روش ترکیبی تعداد بار ذرات برابر مجموع بارهای دو روش قبلی است [۱۷].

$$n(t)=\frac{d_{\mathrm{p}}kT}{2K_{\mathrm{E}}e^2}\ln\left[1+\frac{\pi K_{\mathrm{E}}d_{\mathrm{p}}\bar{c}_{\mathrm{i}}e^2N_{\mathrm{i}}t}{2kT}\right] \qquad (۱۲)$$

$$n(s)=\left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon+2}\right)\left(\frac{Ed^2}{4K_{\mathrm{E}}e}\right) \qquad (۱۳)$$

در این روابط، d_p قطر ذره[5] بر حسب متر، N_i غلظت یون[6] معادل ۱×۱۰^{۱۳}، e بار الکترون معادل $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$، k مقدار ثابت معادل $۱/۳۸\times۱۰^{-۲۳}$، t زمان ماندگاری ذرات در محفظه شارژ ذرات و T دما می‌باشد که به ترتیب برابر ۱ ثانیه و ۲۹۸ K در نظر گرفته شده‌اند. همچنین K_E به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷].

$$K_{\mathrm{E}}=\frac{1}{4\pi\varepsilon}=9\times10^9 \qquad (۱۴)$$

لازم به ذکر است که ε بستگی به جنس ذره دارد که برای ذرات دوده[7] که در این پژوهش مورد نظرند ۳۰ فرض شده است [۱۷]. همچنین E میدان الکتریکی شارژر است که برابر ۵ kV/cm در نظر گرفته شده است.

نیروهای وارد بر ذرات

هر ذره باردار که وارد سایکلون می‌شود سه نیرو را تجربه می‌کند [۱۴] که عبارتند از:

نیروی گرانش[8]:

$$F_g=mg \qquad (۱۵)$$

که در آن F_g نیروی گرانش بر حسب نیوتن، m جرم ذره بر حسب کیلوگرم و g شتاب گرانش که برابر $۹/۸۱\ \mathrm{m/s^2}$ است [۲۴].

1 Drag coefficient
2 Diffusion charging
3 Field charging
4 Combined charging

5 Particle diameter
6 Concentration of ions
7 Soot
8 Force of gravity

نیروی گریز از مرکز[1]:

$$F_c = mr\omega^2 \quad (۱۶)$$

که در آن F_c نیروی گریز از مرکز بر حسب نیوتن، r فاصله از مرکز بر حسب متر و ω سرعت زاویه‌ای[2] بر حسب رادیان بر ثانیه است [۱۴]. مطابق این رابطه هر چه ذرات بزرگ‌تر باشند، نیروی گریز از مرکز بیشتر است و ذرات به سمت استوانه خارجی سایکلون حرکت می‌کنند.

نیروی الکتریکی:

$$F_e = q_c E \quad (۱۷)$$

در این رابطه F_e نیروی الکتریکی بر حسب نیوتن، E شدت میدان الکتریکی بر حسب ولت بر متر و q_c بار الکتریکی ذره بر حسب کولن است [۱۷] که خود از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$q_c = ne \quad (۱۸)$$

که در آن e بار الکتریکی الکترون معادل $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ و n تعداد بار الکتریکی ذره است که برابر مجموع بارهای محاسبه شده از روابط ۱۲ و ۱۳ می‌باشد [۱۷]. با توجه به اینکه هندسه سایکلون در محل اعمال میدان الکتریکی، استوانه‌ای شکل است لذا شدت میدان الکتریکی تابع فاصله شعاعی ذره بوده که از رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد.

$$E=\frac{\Delta v}{R\left(\frac{d_t}{d_w}\right)} \quad (۱۹)$$

در رابطه فوق، Δv اختلاف پتانسیل[3] بر حسب ولت، R موقعیت شعاعی ذره[4] بر حسب متر، d_t قطر استوانه خارجی سایکلون و d_w قطر استوانه داخلی بر حسب متر است [۱۴].

۲- ۳- شرایط مرزی و پارامترهای حل

با توجه به داخلی بودن جریان و اینکه جریان ورودی به سایکلون کاملاً توسعه یافته می‌باشد و با توجه به رینولدز ورودی که بین ۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متغیر است، شدت توبولانس در مجرای ورودی و همینطور در سطح خروجی برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است. پروفیل سرعت در مرز ورودی به صورت یکنواخت بوده و شدت سرعت ورودی به گونه است که دبی ورودی برابر مقادیر ارائه شده در جدول ۳ گردد. همچنین شرایط دیواره‌ها و ورودی و خروجی‌ها مطابق جدول ۲ تعریف شده است.

همانطور که پیشتر گفته شد برای حرکت ذرات از مدل فاز گسسته[5] استفاده شده است. در خصوص تزریق ذرات، از تزریق گروهی استفاده شده به این صورت که مختصات مرکز سطح ورودی مشخص شده و ذرات در این مختصات با سرعتی برابر سرعت هوای ورودی وارد سایکلون می‌شوند. همچنین برای کوپلینگ فشار-سرعت از الگوریتم سیمپل[6] استفاده شده و برای فشار از طرح درونیابی پرستو[7] استفاده گردیده است. ضمناً شبیه‌سازی‌ها با ۱۰۰۰ تکرار و گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه انجام شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه زمانی که باقیمانده معادله پیوستگی از ۱×۱۰^{-۵} و سرعت از ۱×۱۰^{-۴} کمتر شد، فرض می‌شود که همگرایی اتفاق افتاده است.

۳- تحلیل عددی

۳- ۱- بررسی استقلال از شبکه

در این مطالعه مش‌ها از نوع مثلثی[8] بوده و الگوریتم پچ کانفرمینگ[9] برای مش‌زنی استفاده شده است [۱۶ و ۲۵ و ۲۶]. همچنین برای بهبود نتایج و بالا بردن دقت، اندازه مش‌ها در اطراف دیواره ریزتر شده است [۲۷]. شکل ۲ نمونه‌ای از هندسه شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت سرعت محوری، این پارامتر برای بررسی استقلال از شبکه انتخاب شده است [۲۸ و ۲۹]. شکل ۳ این سرعت را در ارتفاع z=+۱۸ mm نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که همین ارتفاع برای اعتبارسنجی نیز استفاده شده است که جزئیات آن در بخش ۳-۲ ارائه گردیده است. همچنین برای

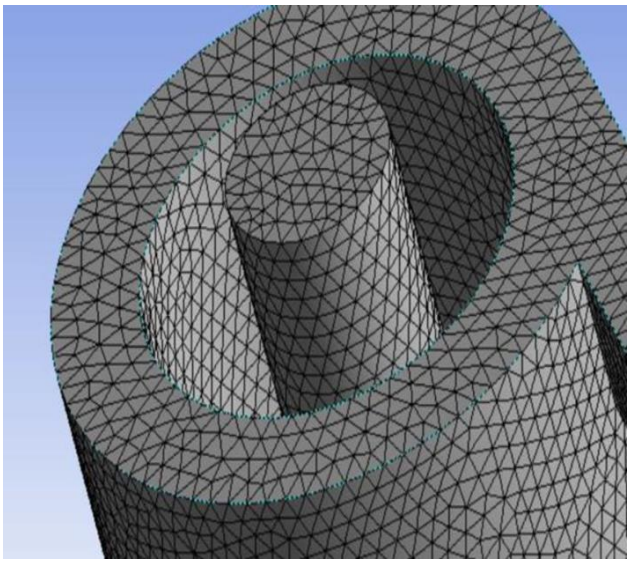
1 Centrifugal force
2 Angular velocity
3 Voltage difference
4 Radial position
5 Discrete Phase Model (DPM)
6 Simple
7 Presto
8 Tetrahedrons
9 Patch conforming

جدول ۲. شرایط مرزی دیواره‌ها

Table 2. Boundary conditions of the walls

مرز	شرایط مرزی	
	فاز گسسته	جریان هوا
دیواره سایکلون	تله[1]	دیوار[2]
ورودی سایکلون	گریز[3]	ورودی سرعت[4]
خروجی بالای سایکلون	تله	خروجی فشار[5]
خروجی پایین سایکلون	گریز	خروجی فشار

[1] Trap
[2] Wall
[3] Escape
[4] Velocity inlet
[5] Pressure outlet



شکل ۲. شبکه‌بندی سایکلون

Fig. 2. Generated mesh

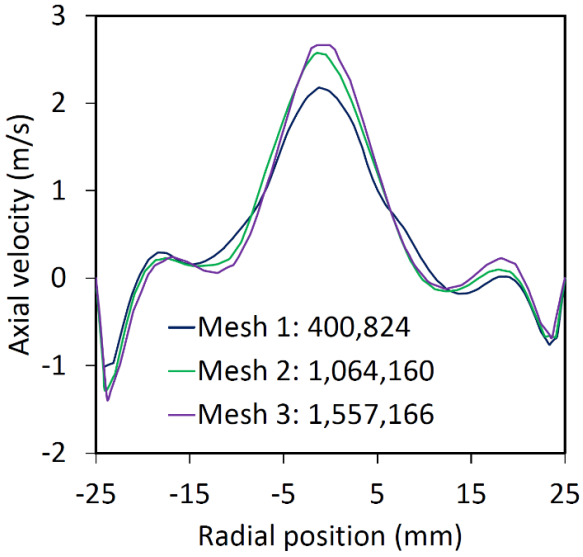
بررسی استقلال از شبکه، سیال ورودی به سایکلون هوا در شرایط استاندارد و دبی حجمی ورودی به سایکلون ۲۰ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که از یک طرف با افزایش تعداد مش نمودارهای سرعت مطابقت بیشتری با یکدیگر پیدا می‌کنند. از طرف دیگر نمودارهای سرعت برای تعداد مش ۱۰۶۴۱۶۰ و ۱۵۵۷۱۶۶ تقریباً یکسان بوده و به طور میانگین اختلاف این دو نمودار سرعت با احتساب بیش از ۱۲۰ نقطه در فاصله‌های شعاعی متفاوت کمتر از ۱ درصد است. بنابراین برای اطمینان از دقت کافی و در عین حال سرعت بالا در شبیه‌سازی‌ها، از تعداد ۱۰۶۴۱۶۰ مش استفاده شده است.

۳- ۲- اعتبارسنجی

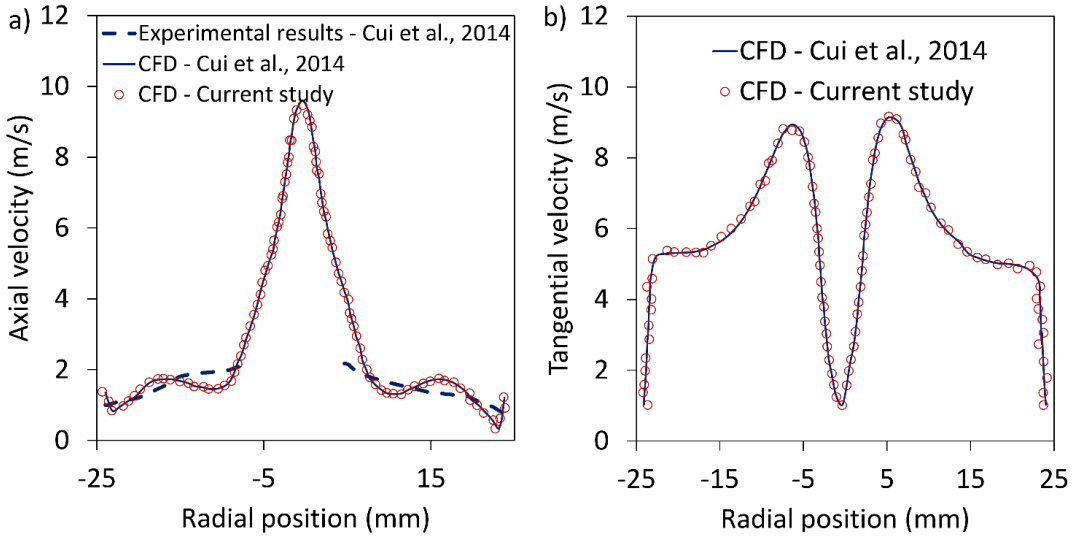
سرعت محوری و سرعت مماسی در داخل سایکلون توسط کوی[1] و همکاران [۲۸] به صورت حل عددی و همچنین اندازه‌گیری تجربی بدست آمده است. به منظور اطمینان از اعتبار و صحت شبیه‌سازی‌ها، این سرعت‌ها با مقادیر گزارش شده توسط کوی و همکاران [۲۸] در شکل ۴ مقایسه گردیده است. لازم به ذکر است که هندسه مورد استفاده برای اعتبارسنجی دقیقاً معادل طرح $G1$ بوده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مشابه آنچه در استقلال از شبکه گفته شد، نمودار سرعت در ارتفاع

1 Cui



شکل ۳. مقایسه سرعت محوری برای حل با تعداد مش متفاوت

Fig. 3. Comparison of axial velocilty for analysis with different number of mesh

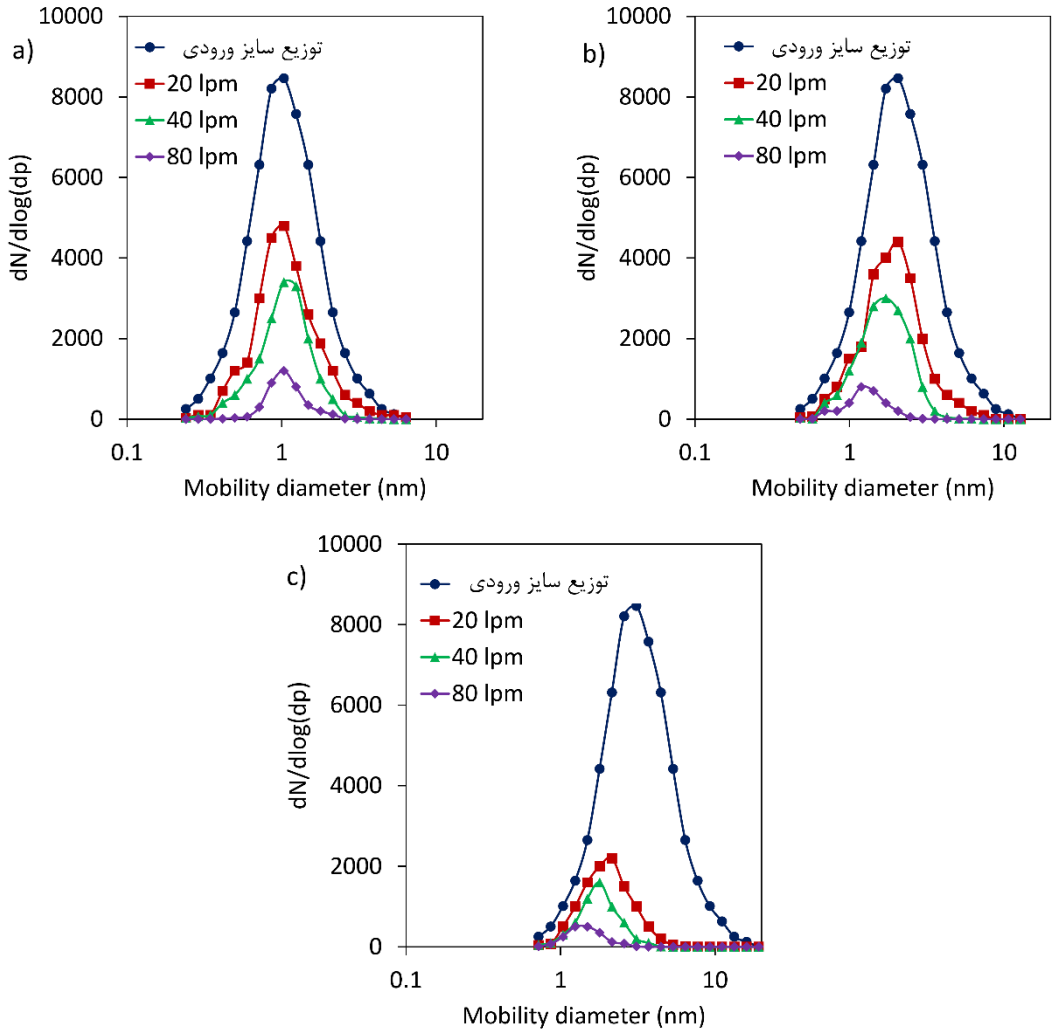


شکل ۴. مقایسه سرعت محوری در مطالعه حاضر با مطالعه کوی و همکاران [۲۹]

Fig. 4. Comparison of axial velocilty estimated in the current study with the results reported by Cui et al. [29]

z=+۱۸ mm با نتایج مطالعه کوی و همکاران [۲۸] مقایسه شده است. شایان ذکر است که برای اعتبارسنجی سیال ورودی به سایکلون هوا در شرایط استاندارد و دبی حجمی ورودی به سایکلون ۶۰ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود نمودارهای سرعت حاصل از شبیه‌سازی توافق بسیار خوبی را نشان می‌دهند. به طور متوسط اختلاف بین دو نمودار سرعت برای سرعت محوری و مماسی کمتر از ۱ درصد بوده که این اختلاف ناچیز تأیید کننده صحت شبیه‌سازی می‌باشد. شکل a۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی ارائه شده در مطالعه کوی و همکاران [۲۸] را نیز نشان می‌دهد. علی‌رغم اینکه نتایج شبیه‌سازی در مطالعه حاضر با نتایج تجربی ارائه شده در مطالعه کوی و همکاران [۲۸] نشان دهنده اختلاف بیشتری نسبت به نتایج شبیه‌سازی است، ولی این اختلاف هنوز در حدود



شکل ۵. توزیع‌های اندازه ورودی و خروجی در دبی‌های مختلف

Fig. 5. Inlet and outlet particle size distributions for different flow rates

۱۰٪ به طور متوسط می‌باشد که قابل قبول ارزیابی می‌گردد.

۴- نتایج و بحث

۴- ۱- تعیین توزیع اندازه ورودی ذرات

برای انجام جداسازی ذرات در ابتدا لازم است که توزیع اندازه مناسب با توجه به هندسه سایکلون مورد نظر شناسایی شود. به این معنی که اگر توزیع اندازه شامل ذرات بسیار بزرگ باشد، ممکن است تمامی ذرات در داخل سایکلون بمانند و چیزی از آنها از سایکلون خارج نشود. به عبارت دیگر، برای هر سایکلون یک قطر ۵۰ درصد[1] قابل تعریف است، به این معنی که برای این قطر، ۵۰ درصد ذرات جذب سایکلون می‌شوند. ذرات بزرگتر از این قطر بستگی به اندازه‌شان بیشتر جذب شده و کمتر خارج می‌شوند و بالعکس ذرات کوچکتر بیشترشان از سایکلون خارج می‌شوند. برای مشخص کردن توزیع اندازه مناسب، توزیع‌های متعدد ورودی مورد بررسی قرار گرفتند. به جز هندسه سایکلون، سرعت ورودی ذرات و بالتبع دبی جریان هوای ورودی نیز در رفتار سایکلون برای جذب ذرات مؤثر است. دلیل این امر نیز به اساس عملکرد سایکلون بر می‌گردد، چرا که با افزایش دبی ورودی، گردابه قویتری در داخل سایکلون شکل می‌گیرد و نیروی گریز از مرکز وارد شده به ذرات افزایش می‌یابد. بنابراین در مطالعه حاضر سه توزیع اندازه متفاوت با سه دبی ورودی مختلف برای هر یک بررسی شدند تا نتیجتاً توزیع اندازه و دبی ورودی مناسب انتخاب گردد. لازم به ذکر است که برای این حالت، ذرات باردار نبوده و تنها تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز می‌باشند.

شکل ۵ توزیع اندازه ورودی و خروجی برای حالتهای مطالعه شده را

1 d50

جدول ۳. قطر متوسط و تعداد ذرات ورودی و خروجی برای دبی‌های ورودی مختلف

Table 3. Count median diameter and number of particles for different flow rates

دبی‌های ورودی	حالت اول نشان داده شده در شکل ۴a		حالت دوم نشان داده شده در شکل ۴b		حالت سوم نشان داده شده در شکل ۴c	
	تعداد ذرات	قطر متوسط ذرات	تعداد ذرات	قطر متوسط ذرات	تعداد ذرات	قطر متوسط ذرات
ذرات ورودی	۴۶۰۰	۱/۰۴	۴۶۰۰	۲/۰۷	۴۶۰۰	۳/۱۱
دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه	۲۱۱۹	۱/۰۶	۱۹۴۱	۱/۸۷	۸۴۶	۱/۹۹
دبی ۴۰ لیتر بر دقیقه	۱۳۱۳	۱/۰۲	۱۲۴۶	۱/۶۳	۴۵۶	۱/۷۵
دبی ۸۰ لیتر بر دقیقه	۳۱۵	۱/۰۷	۲۳۵	۱/۲۶	۱۵۰	۱/۴۴

نشان می‌دهد. توزیع اندازه‌ها به این شکل محاسبه شده‌اند که ابتدا توزیع اندازه پیوسته‌ای برای ورودی در نظر گرفته شده و سپس حدود ۲۰ سایز مشخص که بتوان از طریق آنها توزیع اندازه پیوسته را از درون آنها عبور داد انتخاب شدند. این اندازه‌ها همان‌هایی هستند که در تابع تعریف شده توسط کاربر[1] برای محاسبه نیروی الکتریکی اعمال شده‌اند. حال تعداد ذرات ورودی به نسبت تعداد ذرات هر اندازه مشخصی به سایکلون وارد می‌شوند و برای هر اندازه مشخصی در خروجی سایکلون گزارش گرفته می‌شود. به این ترتیب و با مشخص شدن تعداد ذرات خروجی در هر اندازه، می‌توان توزیع اندازه‌های خروجی را نیز معلوم کرد. در شکل ۵، محور x قطر ذرات بوده و محور y به گونه‌ای محاسبه شده که سطح زیر نمودار برابر تعداد ذرات شود. لذا محور عمودی تعداد ذرات بر قطر ذرات است. البته با توجه به اینکه محور افقی به صورت لگاریتمی رسم شده، لذا محور y هم به شکل تعداد بر لگاریتم قطر محاسبه شده است. همچنین دبی‌های حجمی ورودی بر حسب لیتر بر دقیقه بوده که بر روی شکل با lpm نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در هر سه حالت بررسی شده توزیع اندازه ورودی از لحاظ تعداد ذرات (غلظت کلی ذرات[2]) و انحراف معیار هندسی[3] (این پارامتر نشانگر پهنای منحنی توزیع اندازه می‌باشد)، یکسان بوده و فقط قطر ذرات در حالت‌های مختلف متفاوت است. به عبارت دیگر ذرات ورودی در شکل a۵ کوچک‌تر از سایر حالت‌ها و در شکل c۵ بزرگ‌تر از بقیه حالت‌ها می‌باشند.

جدول ۳ اندازه قطر متوسط ذرات که از رابطه (۲۰) محاسبه شده است را برای همه حالت‌های نشان داده شده در شکل ۵ ارائه می‌دهد. همچنین تعداد ذرات مربوط به همه حالت‌ها که معادل سطح زیر نمودار توزیع‌های اندازه ذرات است در جدول ۳ گزارش شده‌اند.

$$\ln CMD = \frac{\sum n_i \ln d_i}{N} \qquad (۲۰)$$

در این معادله، CMD قطر متوسط ذرات، n_i تعداد ذرات در اندازه‌های مختلف، d_i قطر ذرات در اندازه‌های مختلف و N تعداد کل ذرات می‌باشد [۱۷].

جدول ۳ نشان می‌دهد که در حالت اول قطر متوسط ذرات برای تقریباً همه دبی‌های ورودی ثابت است و در بازه ۱/۰۲ μm تا ۱/۰۷ نوسان می‌کند. ضمن اینکه هر چه دبی بالاتر باشد، تعداد کل ذرات خروجی از سایکلون کمتر می‌شود. این به این معنی است که در داخل سایکلون ذرات بیشتر از طریق مکانیسم نفوذ در حال کم شدن هستند و سرعت‌های گردابه داخل سایکلون حتی در دبی‌های بالا به حدی نیست که بتواند ذرات بزرگتر را از سیال جدا کند.

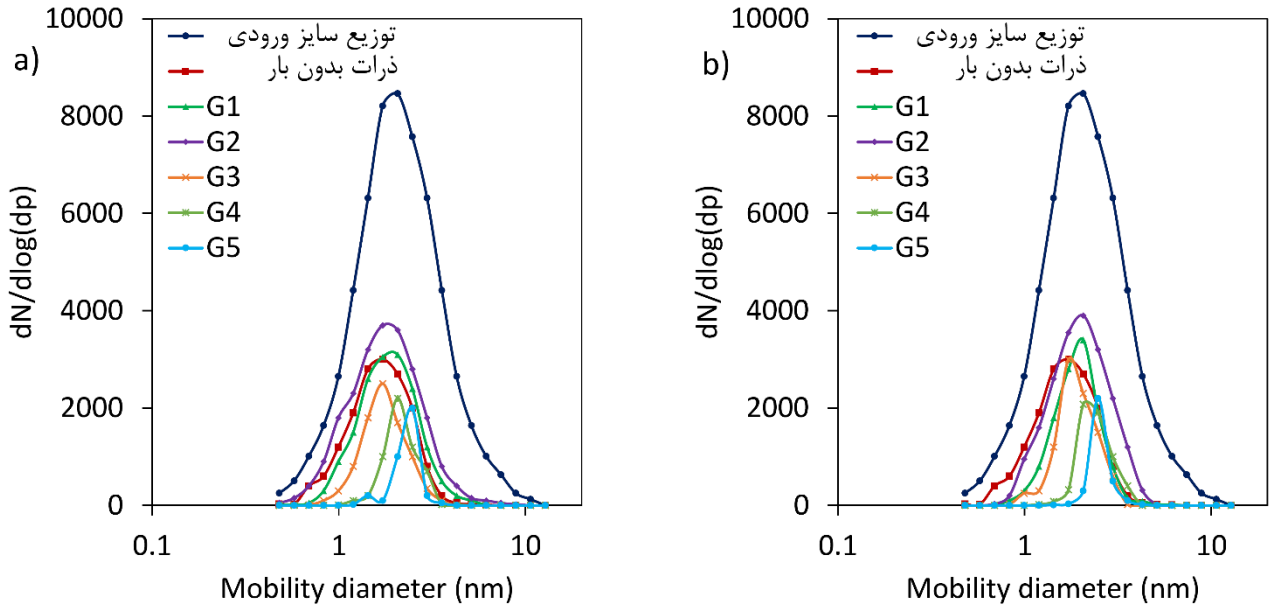
در حالت دوم قطر متوسط با افزایش میزان دبی، کمتر می‌شود که مورد انتظار می‌باشد. دلیل این موضوع این است که در دبی‌های بالاتر، سرعت ورودی و بالتبع سرعت دورانی ذرات بالاتر رفته و نیروی گریز از مرکز

1 User-Defined Function (UDF)
2 Total concentration
3 Geometric standard deviation

بیشتری به ذرات وارد خواهد شد. از آنجا که نیروی گریز از مرکز تابع جرم ذرات است، ذرات بزرگتر بیشتر متأثر شده و با نرخ زیادتری از جریان هوا کم می‌شوند. همین موضوع برای حالت سوم نیز معتبر است و توزیع اندازه با افزایش دبی ورودی به سمت ذرات کوچکتر متمایل می‌شود. باید توجه داشت که قطر متوسط ذرات ورودی برای حالت دوم حدود ۲ µm و برای حالت سوم کمی بیشتر از ۳ µm است. لذا در حالت سوم به دلیل بزرگتر بودن ذرات، ذرات بیشتری در داخل سایکلون به دام خواهند افتاد. بنابراین تعداد ذرات خروجی از سایکلون برای حالت سوم نسبتاً کمتر از سایر حالت‌های بررسی شده است. علیرغم اینکه سایکلون به خوبی در به دام انداختن ذرات بزرگ برای هر دوی حالتهای دوم و سوم کار می‌کند، ولی با توجه به اینکه تعداد ذرات خروجی در حالت دوم بیشتر است، برای ادامه بررسی‌ها در مطالعه حاضر، از توزیع اندازه حالت دوم استفاده خواهد شد. ضمناً از بین دبی‌های ورودی، دبی ۴۰ lpm انتخاب شده چرا که در این دبی قطر ذرات حدود ۲۰ درصد نسبت به قطر ذرات ورودی کوچکتر شده و در عین حال تعداد ذرات خروجی کاهش فوق‌العاده شدیدی نداشته است. جدول ۳ نشان می‌دهد که در این حالت حدود ۱۲۵۰ ذره از سایکلون خارج می‌شود که حدود ۵ برابر بیشتر از تعداد ذرات خروجی در دبی ۸۰ lpm می‌باشد. لازم به ذکر است که اگر برای سایکلون بدون اعمال میدان الکتریکی، تعداد ذرات بسیار کم باشد، پس از باردار کردن ذرات و اعمال میدان، تعداد بسیار کمی از ذرات امکان خروج از سایکلون را خواهند داشت لذا حتی اگر الکتروسایکلون طراحی شده به خوبی ذرات را جداسازی کند، راندمان سایکلون از نظر تعداد ذرات خروجی بسیار پایین بوده که این مطلوب نیست. بنابراین مهم است که علاوه بر عملکرد قابل قبول سایکلون از نظر جداسازی ذرات، تعداد ذرات خروجی نیز قابل توجه باشد.

۴- ۲- بررسی تأثیر هندسه الکتروسایکلون بر عملکرد جداسازی ذرات

پس از تعیین اندازه ورودی ذرات، ذرات ورودی را باردار در نظر گرفته و در داخل سایکلون بین دیواره خارجی و ورتکس فایندر میدان الکتریکی با شدت ۲۰-۳۰ kV/m اعمال می‌شود. شکل ۶ توزیع اندازه ورودی ذرات به همراه توزیع‌های اندازه خروجی برای هندسه‌های مختلف را در اختلاف ولتاژهای ۲۰ kV/m و ۳۰ kV/m و جدول ۴ میزان قطر متوسط، اختلاف معیار هندسی و تعداد ذرات را برای همه حالتها نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۶ و جدول ۴ نشان داده شده است، باردار کردن در هندسه $G1$ منجر به افزایش چشمگیر قطر متوسط ذرات می‌شود که دلیل آن حذف بیشتر ذرات ریزتر نسبت به حالت بدون بار است. به عبارت دیگر، نیروی الکتریکی اعمال شده به ذرات باردار، تأثیر بیشتری بر روی ذرات ریز به دلیل کم‌وزن بودن آنها دارد که این امر به نوبه خود می‌تواند ذرات ریز را با نرخ بالاتری به سمت سیلندر داخلی حرکت داده و این ذرات نهایتاً جذب سیلندر داخلی گردند. به این ترتیب قطر متوسط ذرات به سمت اعداد بزرگتر میل می‌کند. لازم به یادآوری است که نیروی الکتریکی و نیروی گریز از مرکز در جهات متضاد نسبت به یکدیگر بر روی ذرات اثر می‌کنند. جدول ۴ همچنین نشان می‌دهد که میزان ولتاژ اعمال شده تأثیر چندانی روی قطر متوسط ذرات نداشته و برای هر دو میدان الکتریکی، قطر متوسط اختلافی کمتر از ۳٪ دارد. با افزایش قطر سیلندر خارجی (هندسه $G2$) قطر متوسط ذرات خروجی از سایکلون وابستگی بیشتری به میدان الکتریکی اعمال شده به سایکلون پیدا می‌کند. به این معنی که در میدان الکتریکی ۲۰ kV/m، قطر متوسط ذرات خروجی کمتر از هندسه $G1$شده و برای میدان الکتریکی ۳۰kV/m این قطر نسبت به حالت $G1$بیشتر می‌شود. باید به این نکته توجه کرد که با افزایش قطر استوانه خارجی سایکلون، فضای بین دو استوانه بزرگتر شده و ذرات برای برخورد به استوانه خارجی یا داخلی باید فاصله بیشتری را طی کنند. از طرف دیگر، طول استوانه داخلی در هندسه $G2$ تغییر نکرده است لذا زمانی که در اختیار ذرات قرار دارد تا فاصله شعاعی تا یکی از استوانه‌ها را طی کنند نسبت به هندسه $G1$بیشتر نشده است. بنابراین انتظار می‌رود که جمعاً ذرات کمتری به استوانه‌ها برخورد کرده و جذب شوند که این امر به خوبی با مقایسه تعداد کل ذرات خروجی از هندسه $G1$و $G2$ قابل مشاهده است. در عین حال باید گفت که در حالتی که شدت میدان کم است، ذرات بزرگتر بیشتر از افزایش قطر استوانه خارجی متأثر می‌شوند. این به این علت است که نیروی گریز از مرکز به صورت مستقیم با شعاع رابطه داشته در حالیکه نیروی الکتریکی رابطه معکوس با فاصله شعاعی دارد. لذا هر چه قطر استوانه خارجی زیادتر باشد، ذرات به واسطه فاصله بیشتری که از مرکز می‌گیرند، نیروی گریز از مرکز بیشتری و نیروی الکتریکی کمتری را تجربه می‌کنند که این امر موجب می‌شود که ذرات بزرگتر (که در آنها نیروی گریز از مرکز غالب است) با نسبت بیشتری نسبت به ذرات کوچکتر در داخل سایکلون به دام بیفتند. لذا در شکل a۶ می‌توان دید که در هندسه $G2$ و شدت میدان ۲۰kV/m قطر متوسط ذرات نسبت به هندسه $G1$کمتر شده است. این در حالیست که با افزایش شدت میدان، این بار نیروی الکتریکی افزایش یافته حال آنکه نیروی گریز از مرکز بدون تغییر باقی می‌ماند. لذا انتظار می‌رود که در این حالت ذرات کوچکتر بیشتری (که در آنها نیروی



شکل ۶. توزیع‌های اندازه ورودی و خروجی در اختلاف ولتاژ ۲۰ kV/m (a و ۳۰ kV/m (b . این میزان اختلاف ولتاژ بین سیلندر خارجی و ورتکس فایندر اعمال می‌شود.

Fig. 6. Inlet and outlet particle size distributions for a) 20 kV/m and b) 30 kV/m. The electric field is applied between outer wall and vortex finder

جدول ۴. قطر متوسط، اختلاف معیار هندسی و تعداد ذرات ورودی و خروجی از سایکلون در میدان‌های الکتریکی مختلف

Table 4. Count median diameter, geometric standard deviation and total nmber of inlet and outlet particles for different electric field intensities

دبی‌های ورودی	۲۰ kV/m			۳۰ kV/m		
	تعداد ذرات	انحراف معیار هندسی	قطر متوسط ذرات (میکرومتر)	تعداد ذرات	انحراف معیار هندسی	قطر متوسط ذرات (میکرومتر)
توزیع اندازه ورودی	۴۶۰۰	۱/۶۹	۲/۰۷	۴۶۰۰	۱/۶۹	۲/۰۷
ذرات خروجی در حالت بدون بار و هندسه $G1$	۱۲۴۶	۱/۵۶	۱/۶۳	۱۲۴۶	۱/۵۶	۱/۶۳
$G1$	۱۲۶۱	۱/۴۷	۱/۸۳	۹۶۸	۱/۳۵	۱/۸۹
$G2$	۱۷۵۹	۱/۶۰	۱/۷۵	۱۵۶۵	۱/۴۴	۱/۹۵
$G3$	۶۸۶	۱/۳۹	۱/۷۳	۷۲۸	۱/۳۰	۱/۸۸
$G4$	۴۳۱	۱/۲۳	۲/۱۳	۴۵۹	۱/۲۷	۱/۳۸
$G5$	۲۸۳	۱/۲۲	۲/۲۸	۲۵۰	۱/۲۷	۲/۵۳

الکتریکی نیروی غالب است) نیز از جریان هوا حذف شوند. جدول ۴ نشان می‌دهد که میزان اتلاف ذرات کوچکتر به گونه‌ای است که در شدت میدان ۳۰ kV/m، قطر متوسط ذرات به ۱/۹۵ μm می‌رسد.

در طرح $G3$ تمام ابعاد سایکلون معادل مقادیر متناظر در هندسه $G1$ بوده با این تفاوت که فقط قطر استوانه خارجی کاهش پیدا کرده و بنابراین فاصله بین دو استوانه داخلی و خارجی نسبت به هندسه $G1$ کمتر شده است. لذا مشابه آنچه که در بالا گفته شد، از دست رفتن تعداد بیشتری از ذرات در داخل سایلکون اولین نتیجه‌ای است که از این تغییر هندسه می‌توان انتظار داشت. لازم به ذکر است که وقتی فاصله بین استوانه داخلی و خارجی سایکلون کم می‌شود، تعداد زیادی از ذرات به واسطه نفوذ جذب استوانه شده و در سایکلون به دام می‌افتند که این خود می‌تواند دلیل دیگری برای کم شدن تعداد ذرات خروجی از سایکلون در هندسه $G3$ باشد. این نتیجه با داده‌های ارائه شده توسط الفرت و همکاران [۱۴] مطابقت دارد. جدول ۳ نشان می‌دهد که برای حالت $G3$ قطر متوسط ذرات در حدود ۱-۴٪ کمتر از قطر متوسط ذرات برای حالت $G2$ می‌باشد لذا از منظر جداسازی ذرات تفاوت قابل توجهی بین هندسه $G2$ و $G3$ مشاهده نمی‌شود.

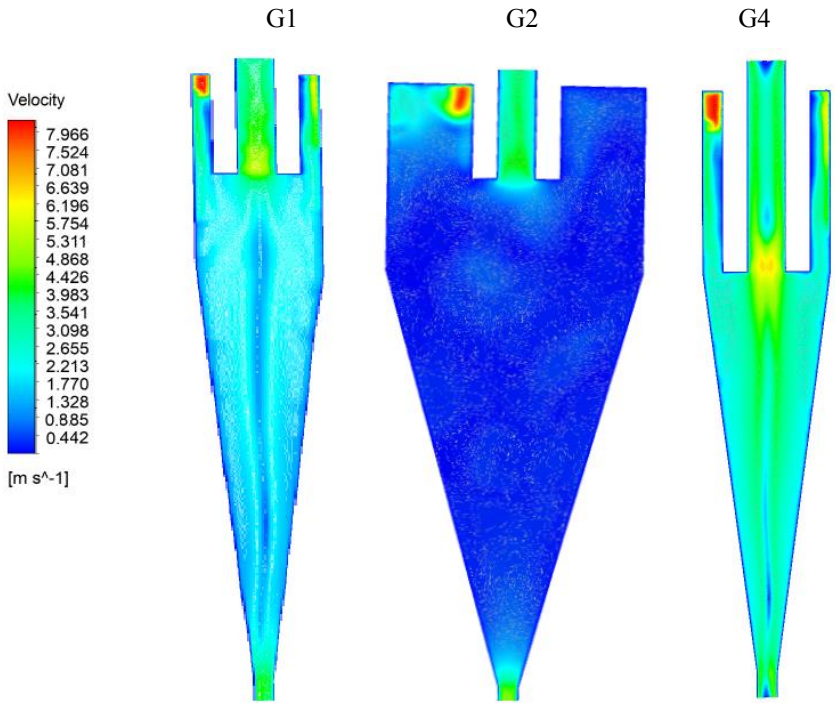
با افزایش طول ورتکس فایندر در دو هندسه $G4$ و $G5$ عملاً زمان مورد نیاز برای خروج ذرات بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، ذرات در این دو هندسه باید فاصله طولانی‌تری را در سرعت ثابت طی کنند تا به ورودی استوانه داخلی رسیده و از آنجا از سایکلون خارج شوند. زمان طولانی‌تر حضور ذرات در داخل سایکلون به ذرات فرصت بیشتری نیز می‌دهد تا فاصله شعاعی بین دو استوانه را طی کنند و این یعنی ذرات بیشتری به دیواره‌ها برخورد کرده و جذب آن‌ها می‌شوند. مقایسه تعداد ذرات خروجی از هندسه $G4$ و $G5$ نسبت به هندسه $G1$ نشان می‌دهد که تعداد ذرات خروجی برای حالتی که طول ورتکس فایندر دو برابر می‌شود ۵۲٪-۷۸٪ کمتر می‌شود. نکته قابل توجه دیگر اینکه زمان بیشتر حضور ذرات در داخل سایکلون برای هر دو شدت میدان بررسی شده در این مطالعه، منجر به کاهش ذرات کوچکتر با نرخ بیشتری شده است. به این ترتیب در هر دو هندسه و برای هر دو شدت میدان قطر متوسط ذرات به بیش از ۲ μm رسیده است. در این خصوص باید به این نکته توجه کرد که ذرات در داخل سایکلون فقط از طریق برهمکنش نیروهای گریز از مرکز و الکتریکی نیست که به دام دیواره‌های سایکلون می‌افتند. بلکه تعدادی از ذرات نیز به واسطه نفوذ جذب دیواره‌ها شده و امکان خروج از سایکلون را پیدا نمی‌کنند. ضریب نفوذ تابع اندازه ذرات بوده و برای ذرات کوچکتر این ضریب به مراتب بالاتر است [۱۷]، لذا ذرات ریزتر به میزان بسیار بیشتری به واسطه نفوذ جذب دیواره‌های سایکلون می‌شوند و این می‌تواند دلیلی برای بزرگتر بودن قطر متوسط ذرات در هندسه‌های $G4$ و $G5$ باشد. ضمناً در این دو هندسه، انحراف معیار هندسی نیز به مراتب کمتر از تمام حالتهای قبلی است. ذکر این نکته ضروری است که انحراف معیار هندسی می‌تواند شاخصی برای راندمان جداسازی ذرات در الکتروسایکلون باشد چرا که انحراف معیار کوچکتر به این معنی است که توزیع اندازه ذرات باریکتر بوده و ذرات در بازه محدودتری از قطر جداسازی شده‌اند. برعکس اگر انحراف معیار هندسی بزرگتر باشد، یعنی ذرات با قطرهای متنوع از سایکلون خارج می‌شوند و به عبارت دیگر سایکلون به خوبی ذرات با جرم مشخصی را از جریان جدا نکرده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که هندسه‌های $G4$ و $G5$ به واسطه طول بزرگتر ورتکس فایندر راندمان جداسازی بالاتری دارند اگر چه که به نسبت سایر طرحها، ذرات بزرگتری را از جریان ورودی جدا کرده‌اند.

۴- ۳- میدان سرعت گاز

شکل ۷ میدان سرعت در داخل سایکلون برای هندسه‌های $G1$، $G2$ و $G4$ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به طور کلی، توزیع سرعت در هندسه $G3$ مشابه با $G1$ و $G5$ مشابه با $G4$ می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش قطر خارجی سایکلون (هندسه $G2$) سرعت جریان هوا در داخل سایکلون کاهش می‌یابد. این در حالیست که افزایش طول استوانه داخلی (هندسه $G4$) به تقویت سرعت در داخل سایکلون می‌انجامد. باید توجه داشت که افزایش سرعت جریان هوا و به تبع آن افزایش سرعت ذرات معلق باعث زیاد شدن نیروی گریز از مرکز شده که خود می‌تواند منجر به جدا شدن بیشتر ذرات بزرگتر از جریان هوا گردد. این موضوع به خوبی در شکل ۶ نیز مشخص است که نشان می‌دهد که در هندسه $G2$ مقدار کمتری از ذرات درشت‌تر (نسبت به هندسه $G1$) در داخل سایکلون به دام افتاده‌اند. برعکس، در هندسه $G4$ مقدار بیشتری از ذرات بزرگتر توسط سایکلون از جریان هوا جدا شده‌اند. این امر منجر به باریک‌تر شدن توزیع اندازه در خروجی شده که به معنای دسته‌بندی بهتر ذرات در هندسه $G4$ نسبت به $G1$ و $G2$ می‌باشد.

۵- جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، امکان استفاده از سایکلون با استفاده از تقابل دو نیروی گریز از مرکز و الکتریکی به منظور جداسازی ذرات میکرونی در یک بازه مشخصی از اندازه به صورت حل عددی بررسی گردید. همچنین تأثیر هندسه



شکل ۷. کانتور سرعت در داخل سایکلون

Fig. 7. Velocity contours inside the cyclone

الکتروسایکلون بر روی عملکرد آن و راندمان جداسازی ذرات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

۱- راندمان الکتروسایکلون به شدت تابع هندسه سایکلون و به خصوص طول ورتکس فایندر می‌باشد. با افزایش طول ورتکس فایندر راندمان جداسازی بر اساس انحراف معیار توزیع اندازه خروجی ذرات و برای هندسه‌های بررسی شده در این مطالعه، بین ۶٪ تا ۱۷٪ افزایش پیدا می‌کند که میزان این افزایش راندمان تابع شدت میدان الکتریکی اعمال شده در داخل سایکلون نیز می‌باشد.

۲- افزایش طول ورتکس فایندر باعث کاهش تعداد ذرات خروجی می‌شود. لذا افزایش بیشتر طول ورتکس فایندر می‌تواند علاوه برافزایش راندمان جداسازی، منجر به کاهش بیش از حد تعداد ذرات خروجی شود که این پدیده، مطلوب نیست. مطالعه بیشتری لازم است که انجام شود تا طول بهینه ورتکس فایندر برای قطرهای خروجی مختلف ذرات مورد ارزیابی قرار گیرد. منظور از طول بهینه ورتکس فایندر طولی است که علاوه بر راندمان جداسازی بالا، تعداد ذرات قابل قبولی نیز از سایکلون خارج شود.

۳- با توجه به تأثیر شدت میدان الکتریکی بر روی راندمان جداسازی، به نظر می‌رسد که با افزایش شدت میدان، می‌توان راندمان جداسازی را افزایش داد و ذرات خروجی را در بازه محدودتری از قطر، از سایکلون خارج نمود. از طرفی باید توجه داشت که انجام این کار نیز می‌تواند تعداد ذرات خروجی را کاهش داده لذا برای شدت میدان الکتریکی نیز مقادیر ماکزیمم قابل تصور است که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.

۴- افزایش سرعت در داخل سایکلون به افزایش نیروی گریز از مرکز و جدا شدن کسر بیشتری از ذرات بزرگتر در داخل سایکلون می‌شود که نتیجتاً راندمان جداسازی را افزایش خواهد داد. به نظر می‌رسد که استفاده از طرحهایی مانند ورودی پیچشی که به افزایش سرعت در داخل سایکلون می‌انجامد، می‌تواند راندمان جداسازی را بهبود بخشد که البته برای بررسی میزان تأثیر آن، لازم است در مطالعه جداگانه‌ای به آن پرداخته شود.

۶- فهرست علائم

عبارت	کمیت	واحد
ρ	دانسیته	kg/m^3
t	زمان	s
u_i	مؤلفه سرعت	m/s
xi	مؤلفه طول	m
u	سرعت در جهت x	m/s
v	سرعت در جهت y	m/s
w	سرعت در جهت z	m/s
g	شتاب جاذبه	m/s^2
μ	گرانروی	$N.s/m^2$
p	فشار سیال	Pa
u_p	سرعت ذره	m/s
a_x	شتاب ذره حاصل از نیروهای سطحی	m/s^2
F_D	نیروی پسا	N
C_D	ضریب پسا	-
Re	عدد رینولدز	-
$n(t)$	تعداد بار ذرات به روش نفوذ	#
$n(s)$	تعداد بار ذرات به روش میدانی	#
c_i	سرعت متوسط یون	m/s
d_p	قطر ذره	m
N_i	غلظت یون	$1/m^3$
e	بار الکترون	C
k	مقدار ثابت	$m^2.kg/s^2.K^{-1}$
T	دما	K
k_E	مقدار ثابت	$N.m^2/C^2$
E	شدت میدان الکتریکی	V/m
ε	مقدار ثابت وابسته به جنس ذره	-
F_g	نیروی گرانش	N
m	جرم ذره	kg
r	فاصله شعاعی ذره	m
ω	سرعت دورانی	$1/s$
F_c	نیروی گریز از مرکز	N
F_e	نیروی الکتریکی	N
q_c	بار الکتریکی ذره	C
Δv	اختلاف ولتاژ دیواره‌های سایکلون	V
d_t	قطر استوانه خارجی سایکلون	m
d_w	قطر استوانه داخلی سایکلون	m

منابع

[1] R. Xiang, S. Park, K. Lee, Effects of cone dimension on cyclone performance, Journal of Aerosol Science, 32(4) (2001) 549-561.

[2] A. Avci, I. Karagoz, Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators, Journal of Aerosol Science, 34(7) (2003) 937-955.

[3] Z. Xiong, Z. Ji, X. Wu, Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones, Powder Technology, 253 (2014) 644-649.

[4] T.-C. Hsiao, S.-H. Huang, C.-W. Hsu, C.-C. Chen, P.-K. Chang, Effects of the geometric configuration on cyclone performance, Journal of Aerosol Science, 86 (2015) 1-12.

[5] Y. Yao, Z. Huang, M. Zhang, H. Yang, J. Lyu, J. Wang, Effects of the Y-shape stud and outer insulating layer on heat dissipation and wall temperature of the hot cyclone in a circulating fluidized bed boiler, Applied Thermal Engineering, 204 (2022) 117989.

[6] S. Venkatesh, R.S. Kumar, S. Sivapirakasam, M. Sakthivel, D. Venkatesh, S.Y. Arafath, Multi-objective optimization, experimental and CFD approach for performance analysis in square cyclone separator, Powder Technology, 371 (2020) 115-129.

[7] R. Shastri, L.S. Brar, Numerical investigations of the flow-field inside cyclone separators with different cylinder-to-cone ratios using large-eddy simulation, Separation and Purification Technology, 249 (2020) 117149.

[8] M. Wasilewski, L.S. Brar, G. Ligus, Experimental and numerical investigation on the performance of square cyclones with different vortex finder configurations, Separation and Purification Technology, 239 (2020) 116588.

[9] H.-T. Kim, K. Lee, M. Kuhlman, Exploratory design modifications for enhancing cyclone performance, Journal of aerosol science, 32(10) (2001) 1135-1146.

[10] B. Zhao, H. Shen, Y. Kang, Development of a

symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance, Powder Technology, 145(1) (2004) 47-50.

[11] M. Wasilewski, L.S. Brar, G. Ligus, Effect of the central rod dimensions on the performance of cyclone separators-optimization study, Separation and Purification Technology, 274 (2021) 119020.

[12] M. Mofarrah, Y. Hojjat, S. Mashayekh, Z. Liu, K. Yan, Introduction and simulation of a small electro cyclone for collecting indoor pollen particles, Advanced Powder Technology, 33(1) (2022) 103384.

[13] K. Ehara, Aerosol mass spectrometer and method of classifying aerosol particles according to specific mass, in, Google Patents, 1995.

[14] J. Olfert, N. Collings, New method for particle mass classification—the Couette centrifugal particle mass analyzer, Journal of Aerosol Science, 36(11) (2005) 1338-1352.

[15] J. Olfert, A numerical calculation of the transfer function of the fluted centrifugal particle mass analyzer, Aerosol science and technology, 39(10) (2005) 1002-1009.

[16] O. Panahi, A.M. Movahed, H.R. Nazif, Investigation of the effects of geometry and intake conditions on electrocyclone efficiency, in: Second national conference on micro/nano technology, Qazvin, 2020. (in Persian)

[17] W. Hinds, Aerosol Technology: properties, behavior and measurement of airborne particles. 2ª edição, New York: Willey Interscience Publication, John Willey & Sons Inc, (1998).

[18] F. Sotiropoulos, S. Abdallah, The discrete continuity equation in primitive variable solutions of incompressible flow, Journal of Computational Physics, 95(1) (1991) 212-227.

[19] B. Yu, W.-Q. Tao, J.-J. Wei, Y. Kawaguchi, T. Tagawa, H. Ozoe, Discussion on momentum interpolation method for collocated grids of incompressible flow, Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals, 42(2) (2002) 141-166.

[20] D. Wilcox, Turbulence modeling for CFD (Vol. 2, pp. 103-217), La Canada, CA: DCW Industries, (1998).

[21] B. Murthy, J. Joshi, Assessment of standard k–ε, RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs, Chemical engineering science, 63(22) (2008) 5468-5495.

[22] F. Pereira, C. Ataíde, M. Barrozo, CFD Approach using a discrete phase model for annular flow analysis, Latin American applied research, 40(1) (2010) 53-60.

[23] F.M. White, J. Majdalani, Viscous fluid flow, McGraw-Hill New York, 2006.

[24] J.R. Taylor, Post-Use Review: Classical Mechanics, in, American Association of Physics Teachers, 2004.

[25] O. Panahi, A.M. Movahed, H.R. Nazif, Size classification of combstion generated nanoparticles using cyclone in: Second national conference on micro/nano technology, Qazvin, 2020. (in Persian)

[26] A. Kapali, H. Neopane, S. Chitrakar, A. Kayastha, O. Shrestha, Experimental and CFD study of influence of sediment size on efficiency of hydrocyclone for use as sediment separation device, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2020, pp. 012014.

[27] M. Dasar, R.S. Patil, Investigations on various characteristics of novel cyclone separator with helical square fins, Separation Science and Technology, 55(16) (2020) 2994-3011.

[28] B.-y. Cui, D.-z. Wei, S.-l. Gao, W.-g. Liu, Y.-q. Feng, Numerical and experimental studies of flow field in hydrocyclone with air core, Transactions of nonferrous metals society of china, 24(8) (2014) 2642-2649.

[29] L.Y. Hu, L.X. Zhou, J. Zhang, M. Shi, Studies on strongly swirling flows in the full space of a volute cyclone separator, AIChE Journal, 51(3) (2005) 740-749.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Darabi, A. Momenimovahed, Numerical Simulation of an Electro-Cyclone for Classification of Micron-Sized Particles, Amirkabir J. Mech Eng., 54(9) (2022) 1971-1988.

DOI: 10.22060/mej.2022.20926.7341