



بررسی عددی تأثیر محرک پلازما بر بهبود عملکرد یک جداساز سیکلونی هوا-ذرات جامد

امیرحسین کریمی، نیما امانی فرد*، حسام مویدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۰۹

کلمات کلیدی:

سیکلون
محرک پلازما
مدل فاز گسسته
بررسی عددی
عملکرد جداسازی ذرات

خلاصه: در مقاله حاضر، تأثیر جریان ثانویه ناشی از محرک پلازما بر الگوی جریان درون یک سیکلون و عملکرد جداسازی ذرات جامد آن به صورت عددی بررسی شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مؤثر از قبیل ولتاژ اعمالی محرک پلازما، آرایش محرک‌های پلازما، سرعت جریان ورودی به سیکلون و اندازه ذرات جامد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد جداسازی سیکلون در حضور محرک پلازما در تمامی ذرات با قطرهای مختلف بین ۱ الی ۲ میلی‌متر، نسبت به سیکلون بدون حضور پلازما افزایش می‌یابد و مقدار این افزایش بازده در ذرات با قطر بزرگ‌تر (۲ میلی‌متر)، بیشتر می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ اعمالی به محرک‌های پلازما، بیشینه سرعت مماسی درون سیکلون و عملکرد جداسازی آن افزایش می‌یابد. همچنین آرایش قرارگیری محرک‌های پلازما تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و عملکرد جداسازی ذرات درون سیکلون دارد، به نحوی که نصب یکنواخت محرک‌های پلازما در کل ارتفاع بخش استوانه‌ای سیکلون (آرایش نوع یک) موجب بهبود عملکرد جداسازی ذرات نسبت به سایر آرایش‌ها می‌گردد. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که استفاده از محرک پلازما درون سیکلون موجب بهبود ۲۶/۵ درصدی عملکرد جداسازی سیکلون نسبت به حالت بدون محرک پلازما می‌شود.

۱- مقدمه

سیکلون^۱ دستگاهی است که می‌تواند ذرات جامد را از جریان هواپخش^۲ جدا نموده و در واقع دو فاز جامد و گاز را از یکدیگر جدا نماید. سیکلون‌ها از ساختاری ساده بهره می‌برند که از سه بخش دهانه ورودی، بدنه استوانه‌ای سیکلون و بخش مخروطی تشکیل شده است. فرایند جداسازی در سیکلون به این صورت است که هوای آلوده از بخش دهانه ورودی وارد شده و با توجه به هندسه سیکلون یک جریان گردابه‌ای به وجود می‌آورد که در این جریان مقدار نیروی اینرسی اعمال شده به ذرات جامد چندین برابر مقدار نیروی اینرسی اعمال شده به ذرات گاز است که این امر موجب شتابگیری ذرات جامد، حرکت به سمت پایین سیکلون و جدایش از فاز گاز می‌شود [۱-۳].

مطالعات متعددی بر کنترل جریان درون سیکلون‌ها به منظور بهبود عملکرد و افزایش راندمان آن‌ها انجام شده است. به‌طور کلی روش‌های کنترل جریان به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین

- 1 Cyclone
- 2 Aerosol

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: namanif@guilan.ac.ir

مطالعات انجام شده بر روش‌های غیرفعال به منظور بهبود عملکرد و افزایش راندمان سیکلون‌ها، متمرکز بر روی هندسه سیکلون‌ها بوده است و در این زمینه مطالعات بر روی تغییرات کلی هندسه، بخش ورودی و همچنین بخش مخروطی صورت پذیرفته است. استیرمند [۴] رایج‌ترین و مهم‌ترین منطبق طراحی را برای طراحی یک سیکلون بهینه ارائه نمود. وی پیشنهاد کرد ارتفاع ناحیه استوانه‌ای یا همان بدنه سیکلون و ارتفاع ناحیه خروجی باید به ترتیب ۱/۵ و ۰/۵ برابر قطر ناحیه استوانه‌ای سیکلون باشد تا بتوان به بهترین عملکرد سیکلون دست یافت. او با ارائه این مدل پیشنهادی توانست دستورالعملی را برای طراحی سیکلون‌ها در بازه گسترده‌ای از ابعاد و سرعت‌ها ارائه دهد. الساید و لاکور [۵] به صورت عددی تأثیر تغییرات هندسه کلی سیکلون بر عملکرد آن را بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از یک مدل سازی ریاضی و شبیه‌سازی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی به دنبال بهینه‌سازی هندسه سیکلون جهت رسیدن به حداقل افت فشار بودند که مدل پیشنهادی آن‌ها تشابه زیادی با مدل استیرمند [۴] داشت. همچنین زو و همکاران [۶]، شیانگ و لی [۷] و لیم و همکاران [۸] در پژوهش‌هایی جداگانه به بررسی سیکلون‌های

توجهی بر سرعت‌های متوسط درون سیکلون دارد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که با افزایش سرعت ورودی به سیکلون، تأثیر جریان ناشی از الکتروهایدرودینامیک کاهش می‌یابد. چن [۲۲] تأثیر میدان الکتریکی بر نیروی گریز از مرکز و جریان درون سیکلون را به صورت تجربی ارزیابی نمود. وی با ترکیب یک سیکلون و یک رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلوولت، توزیع اندازه ذرات در بالادست و پایین دست سیکلون را به ازای دبی‌های حجمی مختلف اندازه‌گیری نمود. نتایج حاکی از آن بود که راندمان سیکلون در حضور میدان الکتریکی رابطه معکوس با دبی حجمی دارد. به عبارت دیگر با افزایش دبی راندمان این نوع سیکلون‌ها کاهش می‌یابد. دارابی و مومنی موحد [۲۳] تأثیر اعمال میدان الکتریکی بین استوانه داخلی و خارجی سیکلون بر راندمان جداسازی ذرات با جرم مشخص را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین تأثیر هندسه سیکلون و شدت میدان الکتریکی را ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییر قطر استوانه‌های داخلی و خارجی سیکلون تأثیر قابل توجهی بر راندمان جداسازی ذرات ندارد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با تغییر دبی حجمی جریان ورودی و تغییر شدت میدان الکتریکی اعمال شده، امکان جداسازی ذرات با اندازه‌های متفاوت فراهم می‌گردد. جون و پارک [۲۴] تأثیر اعمال میدان الکتریکی بر افزایش راندمان جداسازی یک سیکلون و همچنین حذف ذرات بسیار ریز با اندازه ۰٫۳ میکرومتر را به صورت تجربی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که به ازای ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلوولت در دبی حجمی ۴۰۰ لیتر بر دقیقه، راندمان سیکلون ۷۶ درصد بهبود می‌یابد. ژانگ و همکاران [۲۵] تأثیر هم‌زمان میدان مغناطیسی و الکتریکی بر بهبود عملکرد جذب سیکلون را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها راندمان جمع‌آوری ذرات زیر میکرون^۴ در سیکلون را در ولتاژهای اعمالی و شدت شار مغناطیسی مختلف ارزیابی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که با اعمال هم‌زمان میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی، راندمان جمع‌آوری ذرات در سیکلون به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ولتاژ اعمالی، راندمان جمع‌آوری در سیکلون افزایش می‌یابد.

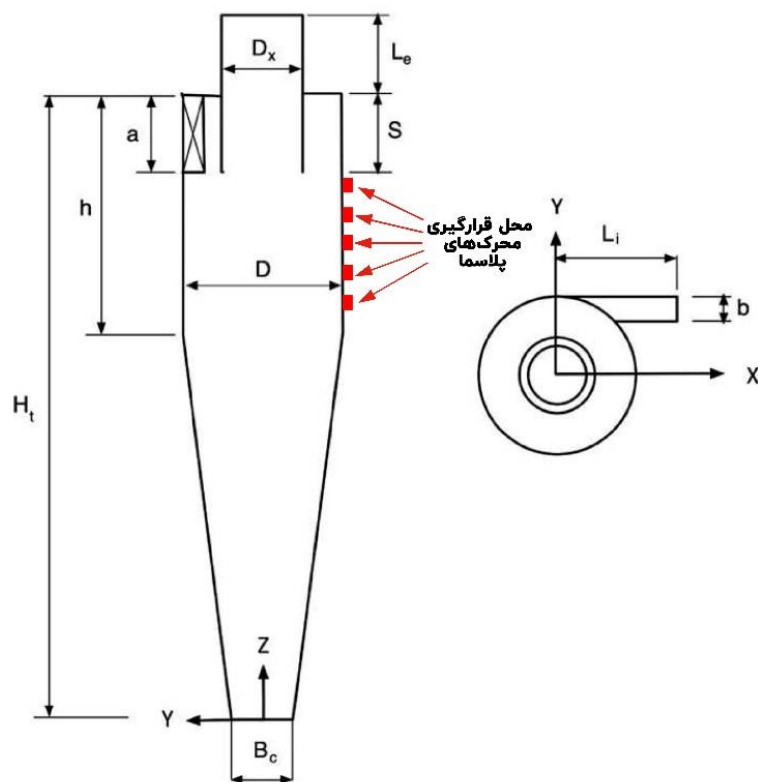
اخیراً محرک‌های پلاسمای تخلیه دی‌الکتریک سطحی^۵ به عنوان یکی دیگر از ابزارهای کنترل جریان فعال، به دلیل ویژگی‌های خاص بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳۰-۲۶]. این محرک‌ها کاملاً الکتریکی و فاقد قطعات متحرک مکانیکی می‌باشند، سریع واکنش نشان می‌دهند و برای کنترل‌های فعال وابسته به زمان بسیار منعطف بوده و همچنین در دستگاه‌ها با کمترین

دوگانه^۱ پرداختند. آن‌ها دریافتند که سیکلون‌های دوگانه اگرچه دارای افت فشار کمتری نسبت به هندسه پیشنهادی توسط استیرمند [۴] دارند، اما دارای بازده عملکرد جداسازی پایین‌تری می‌باشند. وانگ و همکاران [۹] و یوشیدا و همکاران [۱۰] به صورت عددی و تجربی عملکرد جداسازی سیکلون نوع لینویا^۲ را ارزیابی نمودند. لازم به ذکر است که در این نوع سیکلون‌ها به جای یک بخش مخروطی از دو ناحیه مخروطی استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد جداسازی در سیکلون نوع لینویا بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیکلون مدل استیرمند ندارد. الساید و لاکور [۱۱] تأثیر ابعاد ورودی سیکلون در توزیع میدان جریان و همچنین عملکرد جداسازی سیکلون‌ها را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که عرض ورودی در سیکلون‌ها با ورودی‌های مستطیلی نسبت به ارتفاع ورودی آن‌ها تأثیری بیشتری بر راندمان جداسازی دارد. ژائو و همکاران [۱۲] تأثیر هندسه سطح مقطع ورودی سیکلون بر راندمان جداسازی آن را به صورت عددی ارزیابی نمودند. آن‌ها عملکرد جداسازی و توزیع میدان جریان سیکلون با ورودی مستطیلی ساده و سیکلون با دو ورودی مارپیچ را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که به دلیل تقارن بیشتر در توزیع میدان جریان در سیکلونی با دو ورودی مارپیچ، بازده جداسازی سیکلون افزایش می‌یابد. همچنین مطالعاتی نیز بر روی تأثیر زاویه ناحیه ورودی بر عملکرد سیکلون انجام شده است [۱۵-۱۳]. علاوه بر این برخی تحقیقات به مطالعه تأثیر ابعاد ناحیه مخروطی در توزیع میدان جریان و عملکرد جداسازی سیکلون پرداختند. در این زمینه می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط ژانگ و نی [۱۶]، چوای و همکاران [۱۷] و شیانگ و همکاران [۱۸] اشاره نمود. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که با کاهش قطر دهانه ناحیه مخروطی، عملکرد جداسازی سیکلون بهبود می‌یابد. همچنین کیان و همکاران [۱۹] و کایا و کاراگوز [۲۰] تأثیر زاویه ناحیه مخروطی بر بازده جداسازی سیکلون را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که به منظور افزایش عملکرد سیکلون در سرعت‌های ورودی بالا، زاویه ناحیه مخروطی باید کاهش یابد.

از سوی دیگر، استفاده از روش‌های فعال برای کنترل جریان و بهبود عملکرد جداسازی در سیکلون‌ها، توجه محققین زیادی را جلب کرده است. شی و همکاران [۲۱] به صورت عددی تأثیر محرک الکتروهایدرودینامیک^۳ بر الگوی جریان و عملکرد سیکلون را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که اعمال میدان الکتریکی و جریان الکتروهایدرودینامیک تأثیر قابل

-
- 1 Dual cyclone
 - 2 Linoya
 - 3 Electrohydrodynamics

-
- 4 Submicron particles
 - 5 Dielectric Barrier Discharge (DBD)



شکل ۱. نمایی شماتیک از هندسه سیکلون

Fig. 1. Schematic view of the cyclone geometry

پارامترهای مؤثر از قبیل سرعت جریان ورودی به سیکلون، اندازه ذرات، ولتاژ اعمالی به محرک پلاسما، تعداد و همچنین چیدمان محرک‌های پلاسما در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش راندمان جمع‌آوری ذرات می‌باشد.

۲- هندسه مسئله

در این پژوهش از سیکلون با هندسه استیرمند [۴] با قطر ۲۰۵ میلی‌متر استفاده شده است. نمای کلی هندسه سیکلون در شکل ۱ نشان داده شده است. موقعیت محرک‌های پلاسما به صورت شماتیک در شکل ۱ با رنگ قرمز نشان داده شده است. ابعاد هندسی سیکلون در جدول ۱ ذکر شده است. همچنین موقعیت نصب محرک‌های پلاسما روی سیکلون در جدول ۲ ارائه شده است.

نمای شماتیکی از یک محرک پلاسما تخلیه دی‌الکتریک سطحی در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات محرک‌های پلاسما مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.

تغییرات لازم قابل به‌کارگیری می‌باشند [۲۶ و ۲۷]. در محرک‌های پلاسما تخلیه دی‌الکتریک سطحی، اعمال ولتاژ بالای متناوب روی الکترودها باعث می‌شود هوا در مجاورت آن‌ها یونیزه شده و توسط مکانیزم برخورد یونی و تبادل اندازه حرکت بین ذرات باردار و خنثی، یک نیروی حجمی پیشران بوجود می‌آید [۲۹]. از این محرک‌ها جهت ایجاد شتاب و حرکت در سیال ساکن و یا سیال در حال حرکت بهره برده می‌شود [۳۰]. در صنعت هوافضا، محرک‌های پلاسما جهت کاهش نیروی بازدارندگی هواپیما و یا پایداری جریان استفاده می‌شوند [۳۱]. همچنین جریان ناشی از محرک پلاسما یکی از روش‌های نوین به منظور افزایش انتقال حرارت می‌باشد [۳۲].

به این منظور، تحلیل عددی تأثیر اعمال محرک پلاسما به عنوان یکی از ابزارهای فعال کنترل جریان در سیکلون جهت ایجاد شتاب و حرکت جریان سیال، و همچنین افزایش راندمان جمع‌آوری ذرات می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. نوآوری مطالعه حاضر بررسی جریان و عملکرد سیکلون در حضور محرک پلاسما و ارزیابی هم‌زمان تأثیر

جدول ۱. ابعاد هندسه سیکلون

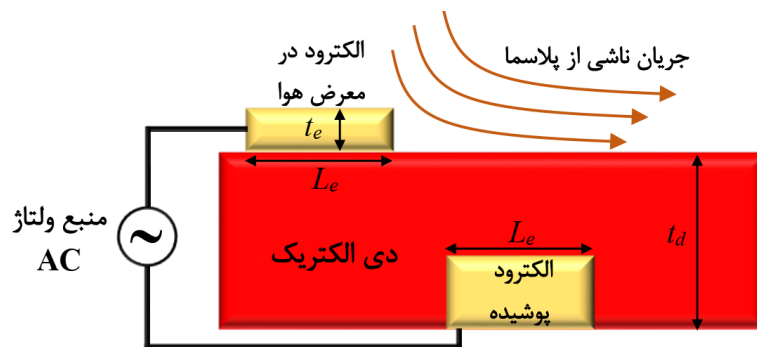
Table 1. Dimensions of the cyclone geometry

مقدار (mm)	پارامتر
۲۰۵	D
۱۰۲٫۵	a
۴۱	b
۱۰۲٫۵	D_x
۸۲۰	H_t
۳۰۷٫۵	h
۱۰۲٫۵	S
۷۳٫۸	B_c
۲۰۵	L_i
۱۲۶٫۶۹	L_e

جدول ۲. مختصات قرارگیری محرک‌های پلاسما

Table 2. Coordinates of positions of DBD plasma actuators

z (mm)	y (mm)	x (mm)	شماره محرک پلاسما
۵۵۰	-۱۰۰	۰	۱
۵۸۰	-۱۰۰	۰	۲
۶۱۰	-۱۰۰	۰	۳
۶۴۰	-۱۰۰	۰	۴
۶۷۰	-۱۰۰	۰	۵



شکل ۲. نمایش شماتیک از یک محرک پلاسما

Fig. 2. Schematic view of a DBD plasma actuator

جدول ۳. مشخصات محرک پلاسما

Table 3. Characteristics of DBD plasma actuator

مقدار	نماد	پارامتر
۷	L_p	طول الکتروود در معرض هوا (mm)
۰٫۰۴	t_e	ضخامت الکتروود (mm)
۶٫۳۵	t_d	ارتفاع دی الکتریک (mm)
۲	ϵ_d	ثابت دی الکتریک
۱۰-۲۵	V	ولتاژ اعمالی (kV)
۱۷	f	فرکانس (kHz)

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادلات میدان جریان و فاز گسسته

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنتم می‌باشند. با توجه به اینکه گردابه‌ای داخل سیکلون و جریان ثانویه ایجاد شده توسط محرک پلاسما به صورت موضعی آشفته است، نیاز است که جریان سیال به صورت آشفته مدل‌سازی شود [۳۳ و ۳۲ و ۱۱]. در این مطالعه، جهت مدل‌سازی جریان آشفته، مدل ۷ معادله‌ای تنش رینولدز^۱ استفاده شده است. همچنین خواص ترمودینامیکی سیال ثابت در نظر گرفته شده است. در ادامه معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته بیان شده است. پیوستگی:

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

مومنتم:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u'_i u'_j \right] + F_{ei} \quad (2)$$

همان‌گونه که در رابطه (۲) مشخص می‌باشد، عبارت آخر معادلات

ناویر-استوکس نیروی حجمی حاصل از اعمال محرک پلاسما بر جریان سیال است.

همچنین به منظور تعیین مسیر حرکت ذرات فاز جامد در جریان دوفازی سیکلون، از مدل فاز گسسته^۲ استفاده می‌شود. در این مدل ذرات فاز جامد سخت فرض شده‌اند. به عبارت دیگر ذرات فاز جامد در برخورد با همدیگر تغییر شکل نخواهند داد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از اثر برخورد بین ذرات فاز جامد صرف‌نظر شده است. با توجه به قطر بسیار کم ذرات فاز جامد می‌توان از اثر حضور آن‌ها در میدان جریان صرف‌نظر نمود. در مدل فاز گسسته تنها نیروی گرانش و نیروی پسای^۳ ناشی از جریان بر روی ذرات فاز جامد اثرگذار خواهند بود [۳۴]. خصوصیات فیزیکی هوا و ذرات جامد نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۲- معادلات نیروی حجمی ناشی از محرک پلاسما

عبارت آخر در معادله (۲) بیانگر نیروهای حجمی ناشی از محرک پلاسما است که در آن تابع توزیع نیروی حجمی پلاسما با یک مدل جبری مطابق معادله (۳) تخمین زده شده است [۲۸]:

$$F_e(x, y) = \frac{\pi^2 thrust}{4lh} \sin\left(\frac{x-x_s}{l} \pi\right) \sin\left(\frac{y-y_s}{h} \pi\right) \quad (3)$$

$$x_s \leq x \leq l + x_s$$

$$y_s \leq y \leq h + y_s$$

2 Discrete phase model (DPM)
3 Drag force

1 Reynolds stress model

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی هوا و ذرات

Table 4. Physical properties of air and particles

نوع فاز	چگالی (kg/m ³)	ویسکوزیته (kg/m.s)	قطر (mm)
هوا	۱٫۲۲۵	۰٫۰۰۰۰۲۱۱	-
ذرات	۷۸۷۴	-	۱-۲

خازن شماره یک با ظرفیت C_1 به نمایندگی از ماده دی‌الکتریک و انتهای الکتروود در تماس با هوا و خازن شماره دو با ظرفیت C_2 به نمایندگی از الکتروود در تماس با هوا و پلاسما تخلیه شده روی دیواره دی‌الکتریک می‌باشند [۲۸]:

$$C_1 = \pi \varepsilon_d \varepsilon_0 \frac{1}{\ln(1 + \frac{4t_d}{t_e})} \quad (۹)$$

$$C_2 = 2\pi \varepsilon_0 \frac{1}{\ln(1 + \frac{2\lambda_d}{t_e})} \quad (۱۰)$$

که در رابطه (۱۰)، اندازه طول دبای، با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط بوچمال [۳۶] بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\lambda_d = 0.2 \times (3 \times 10^{-7} \times V - 7.42 \times 10^{-4}) \quad (۱۱)$$

۳-۳- شرایط مرزی

برای حل معادلات حاکم، به شرایط مرزی نیاز می‌باشد. با توجه به اعمال نیروی حجمی ناشی از محرک پلاسما به صورت یک عبارت جبری، در تحقیق حاضر نیاز به شرایط مرزی و حل معادلات میدان الکتریکی نمی‌باشد. در نتیجه شرایط مرزی به دو بخش میدان جریان و فاز ذرات جامد تقسیم می‌شود. شرایط مرزی برای بخش‌های میدان جریان و فاز ذرات جامد مطابق با جدول ۵ تعریف شده است. همچنین مرزها به صورت شماتیک در شکل ۴ ارائه شده است.

x_s نقطه میانی بین الکتروودهای نصب شده و y_s در سطح دی‌الکتریک است. همچنین l و h ابعاد محدوده تشکیل پلاسما می‌باشند که با مجذور نیروی پیشران ناشی از محرک پلاسما، مطابق با روابط زیر تناسب دارند:

$$l = 0.005 \left(\frac{\text{thrust}}{0.04} \right)^{0.5} \quad (۴)$$

$$h = 0.0018 \left(\frac{\text{thrust}}{0.04} \right)^{0.5} \quad (۵)$$

نیروی پیشران ناشی از محرک پلاسما از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۸]:

$$\text{thrust} = 2\pi f \alpha_1 C_0 (V - V_b)^2 \quad (۶)$$

که α_1 در رابطه فوق یک عدد ثابت است که به صورت تجربی معادل $۰٫۰۰۷$ به دست آمده است. همچنین توماس و همکاران [۳۵] در مطالعه‌ای تجربی برای ولتاژ شکست رابطه زیر را ارائه داده‌اند:

$$V_b = 4.83 + (8 \times 10^2 \times t_d) \quad (۷)$$

علاوه بر این، در معادله (۶)، C_0 ظرفیت خازن معادل محرک پلاسما است که از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد [۲۸]:

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (۸)$$

جدول ۵. شرایط مرزی

Table 5. Boundary conditions

مرز	فاز گسسته	جریان هوا
ورودی سیکلون	جت دیواری ($u_{p,i}=0$ و مقدار ثابت $u_{p,j}=u_{p,k}=0$)	سرعت ورودی ($u_i=0$ و مقدار ثابت $u_j=u_k=0$)
خروجی سیکلون	در رفتن (مقدار ثابت $u_{p,k}=0$ و $u_{p,i}=u_{p,j}=0$)	خروجی ($\partial u_k / \partial z=0$)
دیواره سیکلون	بازتاب ($u_{p,i}=u_{p,r}$)	دیوار ($u_i=u_j=u_k=0$)
دیواره پایین سیکلون	تله ($u_{p,i}=u_{p,j}=u_{p,k}=0$)	دیوار ($u_i=u_j=u_k=0$)

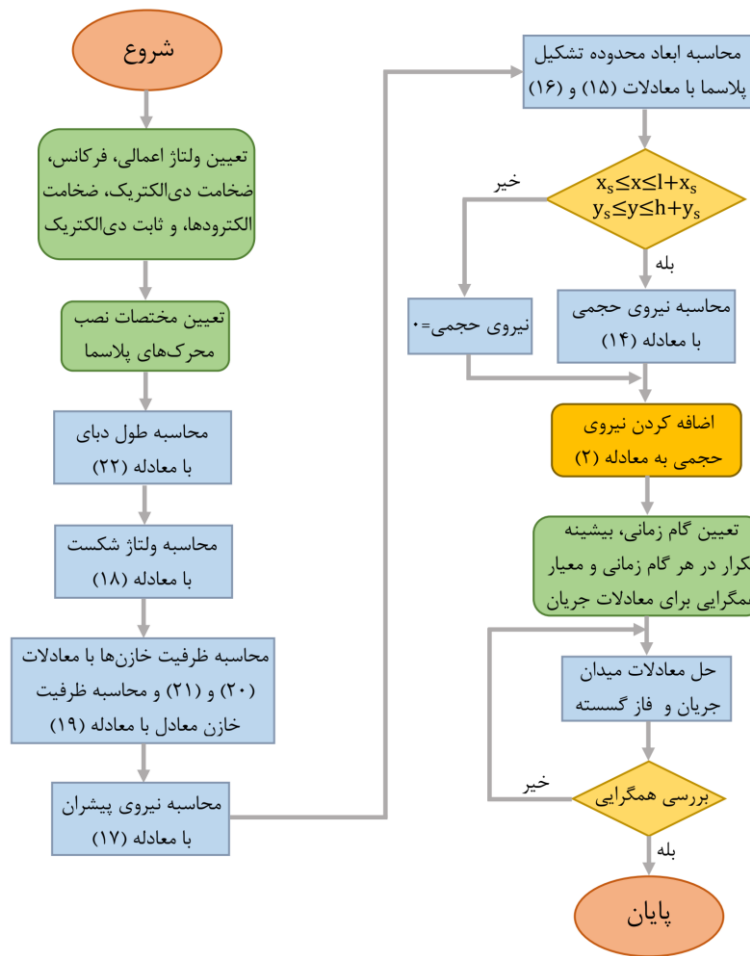
۴- روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم، از بسته نرم‌افزاری فلوئنت استفاده شده و روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم به صورت ناپایا و توسط حل‌کننده بر پایه فشار^۱ و با استفاده از الگوریتم سیمپل سی^۲ حل شده‌اند. همچنین برای گسسته‌سازی در معادله فشار از تقریب پرستو^۳ و برای معادلات ناویر-استوکس از تقریب بالادست مرتبه دوم^۴ استفاده شده است. برای اضافه نمودن نیروی حجمی به معادلات مومنتم، از کدنویسی توابع تعریف شده توسط کاربر^۵ که مبتنی بر زبان برنامه نویسی C است، استفاده شده است. علاوه بر این، پس از بررسی استقلال نتایج از گام زمانی، حل ناپایای این مسئله با گام زمانی ۰٫۰۰۰۲ و بیشینه تکرار ۶۰ در هر گام زمانی انجام شده است. به منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده^۶ ۱۰- می‌باشد. همچنین برای بررسی همگرایی حل عددی، علاوه بر بررسی کاهش باقی‌مانده‌ها، تغییرات چند پارامتر تعیین‌کننده نیز در طول حل و در بازه زمانی تحلیل مسئله، مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات الگوریتم حل مسئله در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵- شبکه محاسباتی و استقلال از شبکه

شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی توسط نرم‌افزار تجاری گمبیت ۴/۴ به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و با بهره بردن از المان‌های شش‌وجهی گوه‌ای و المان‌های چهاروجهی هرمی انجام شده است. همچنین در نواحی که گرادیان‌های شدید مورد انتظار است از شبکه‌بندی دارای تراکم بیشتری نسبت به دیگر نواحی دارد. با توجه به گرادیان سرعت بالا در نقاط مختلف سیکلون‌ها لازم است تا سلول‌ها در اکثر نقاط سیکلون به اندازه کافی کوچک باشند. یکی از این نقاط، نزدیک دیواره‌های سیکلون است، به خصوص دیواره بخش استوانه‌ای که محرک‌های پلاسمایی نیز بر روی این دیواره قرار گرفته‌اند. از این رو تراکم شبکه‌بندی در این نواحی نسبت به دیگر نواحی بیشتر می‌باشد. نمای از شبکه محاسباتی در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، مقدار دبی در خروجی سیکلون، به عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، از چهار شبکه‌بندی مختلف در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه و آرایش نوع یک با ۵ محرک پلازما استفاده شده است. با توجه به جدول ۶ واضح است که با تغییر تعداد شبکه از ۴۲۴۲۴۸ به ۴۹۵۸۲۴ تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد ۴۲۴۲۴۸ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

- 1 Pressure based
- 2 SIMPLE-C
- 3 PRESTO
- 4 Second Order Upwind
- 5 User Defined Function (UDF)



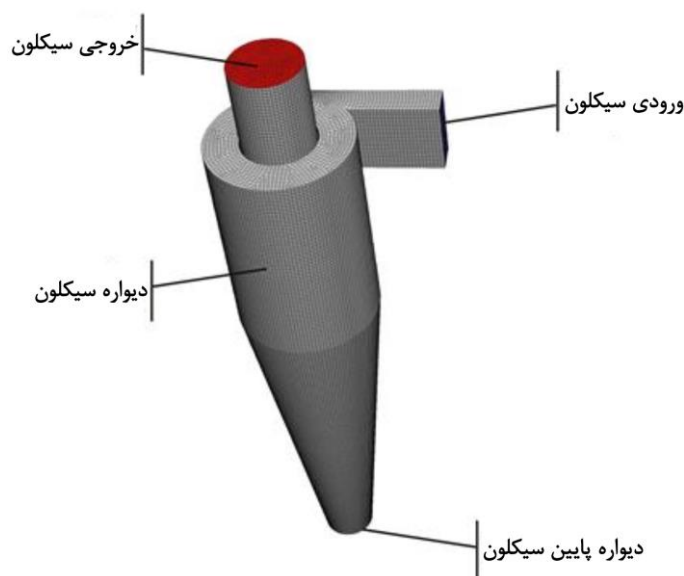
شکل ۳. الگوریتم حل مسئله

Fig. 3. Problem-solving algorithm

جدول ۶. بررسی استقلال از شبکه

Table 6. Grid independence study

مقدار اختلاف (%)	دبی خروجی (kg/s)	تعداد شبکه محاسباتی
-	۰٫۱۲۱۷	۲۲۷۲۶۰
۱۶٫۴۱	۰٫۱۴۵۶	۳۲۵۴۶۴
۵٫۷۴	۰٫۱۳۷۷	۴۲۴۲۴۸
۰٫۰۷	۰٫۱۳۷۸	۴۹۵۸۲۴



شکل ۴. نمایی از شبکه محاسباتی و مرزها

Fig. 4. The view of domain grid distribution and boundaries

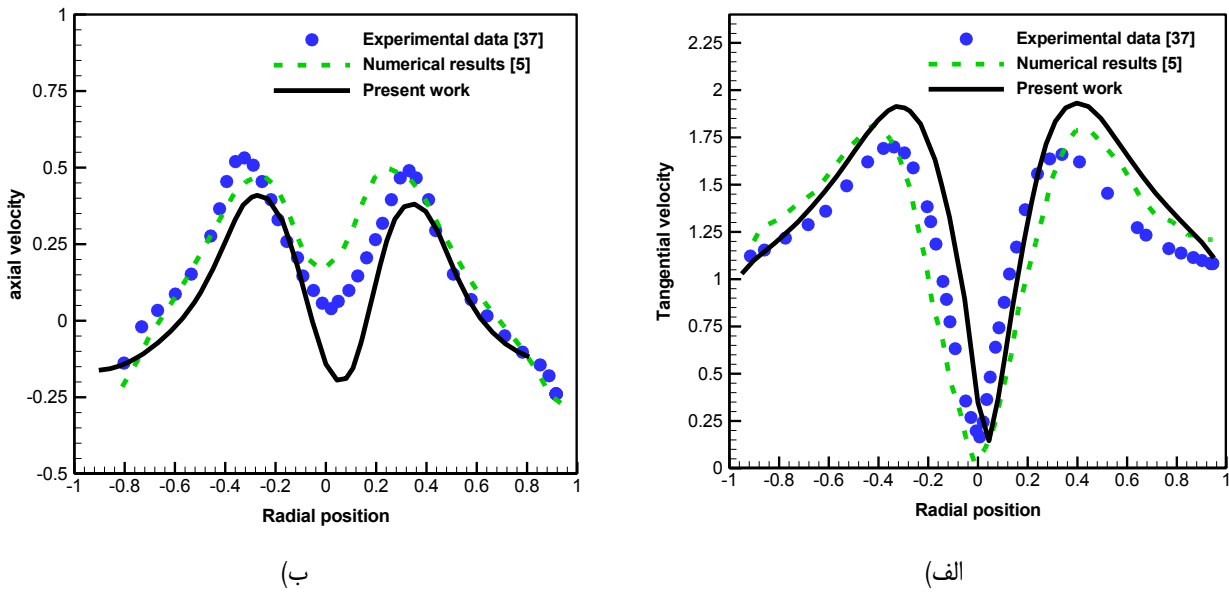
۶- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج حل عددی، نتایج پژوهش حاضر با نتایج تجربی و عددی معتبر مطالعات پیشین مقایسه شده تا دقت نتایج در شرایط و فیزیک یکسان ارزیابی گردد. اعتبارسنجی نتایج تحقیق کنونی به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش اول مربوط به اعتبارسنجی نتایج جریان هوا درون سیکلون با نتایج تجربی هانکسترا [۳۷] و حل عددی الساید و لاکور [۵]، و بخش دوم مربوط به اعتبارسنجی نتایج جریان ناشی از محرک پلازما با نتایج تجربی توماس و همکاران [۳۵] می‌باشد.

در بخش اول، توزیع سرعت مماسی و محوری برحسب شعاع حاصل از حل عددی تحقیق حاضر با نتایج تجربی هانکسترا [۳۷] و حل عددی الساید و لاکور [۵] در شکل ۵ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که سرعت‌ها نسبت به سرعت ورودی سیکلون و شعاع نسبت به شعاع قطاع مذکور از سیکلون بی‌بعد شده‌اند. برای اعتبارسنجی و شرایط یکسان شبیه‌سازی، سیکلون هندسه استیرمند با قطر ۲۰۵ میلی‌متر و سرعت ورودی ۱۹ متر بر ثانیه استفاده شده است. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر برای توزیع سرعت مماسی، با بیشینه خطای

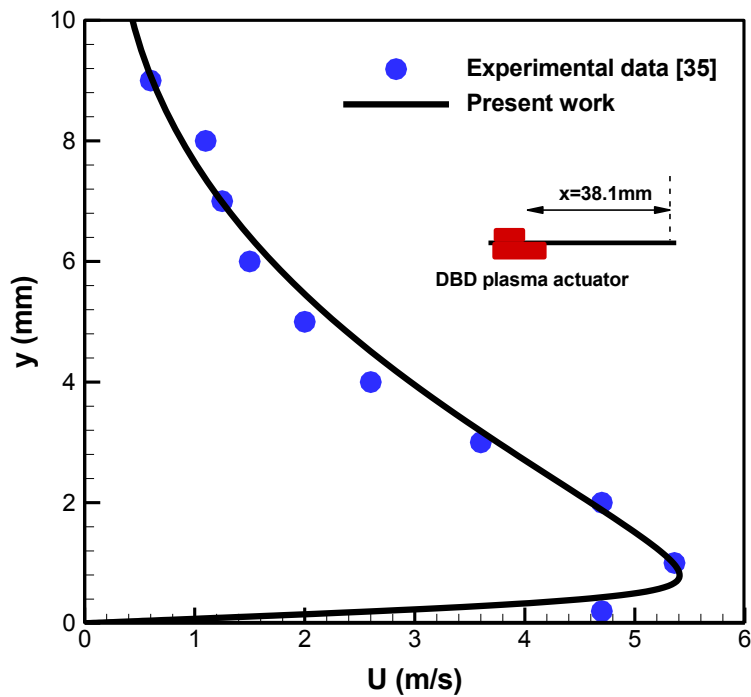
۱۶،۰۴٪ و ۱۳،۸۴٪، تطابق مطلوبی به ترتیب با داده‌های تجربی و نتایج عددی دارد. متوسط خطای توزیع سرعت مماسی تحقیق حاضر نسبت به داده‌های تجربی مرجع ۳۷ و نتایج عددی مرجع ۵ به ترتیب ۴،۱۳٪ و ۳،۴۶٪ می‌باشد. همچنین متوسط خطای توزیع سرعت محوری تحقیق حاضر نسبت به داده‌های تجربی و نتایج عددی به ترتیب ۵،۹۴٪ و ۷،۱۱٪ می‌باشد.

در بخش دوم اعتبارسنجی نتایج، در شکل ۶ نتایج پروفیل سرعت حاصل از مدل‌سازی عددی تحقیق کنونی در فاصله ۳۸۱ میلی‌متری جلوتر از لبه محرک پلازما با نتایج تجربی توماس و همکاران [۳۵] مقایسه شده است. لازم به ذکر است که توماس و همکاران [۳۵] تأثیر محرک پلازما با ولتاژ اعمالی ۲۴ کیلوولت و فرکانس ۲ کیلوهرتز بر جریان هوای ساکن روی یک صفحه‌ی تخت را به صورت تجربی بررسی نمودند. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج عددی مطالعه حاضر با بیشینه خطای ۸،۷۳٪ و متوسط خطای ۲،۱۳٪ تطابق مطلوبی با نتایج توماس و همکاران [۳۵] دارد.



شکل ۵. مقایسه سرعت‌های بی‌بعد نسبت به شعاع بی‌بعد سیکلون در سرعت ورودی ۱۹ متر بر ثانیه الف) سرعت مماسی ب) سرعت محوری

Fig. 5. Comparison of non-dimensional velocities based on the radial position at an inlet velocity of 19 m/s (a) Tangential velocity (b) Axial velocity



شکل ۶. مقایسه‌ی پروفیل سرعت در فاصله ۳۸/۱ میلی‌متری جلوتر از لبه محرک پلاسما (V=۲۴ kV, f=۲ kHz)

Fig. 6. Comparison of the velocity profiles at x=38.1 mm downstream of the plasma actuator (V=24 kV, f=2 kHz)

۷- بحث و بررسی نتایج

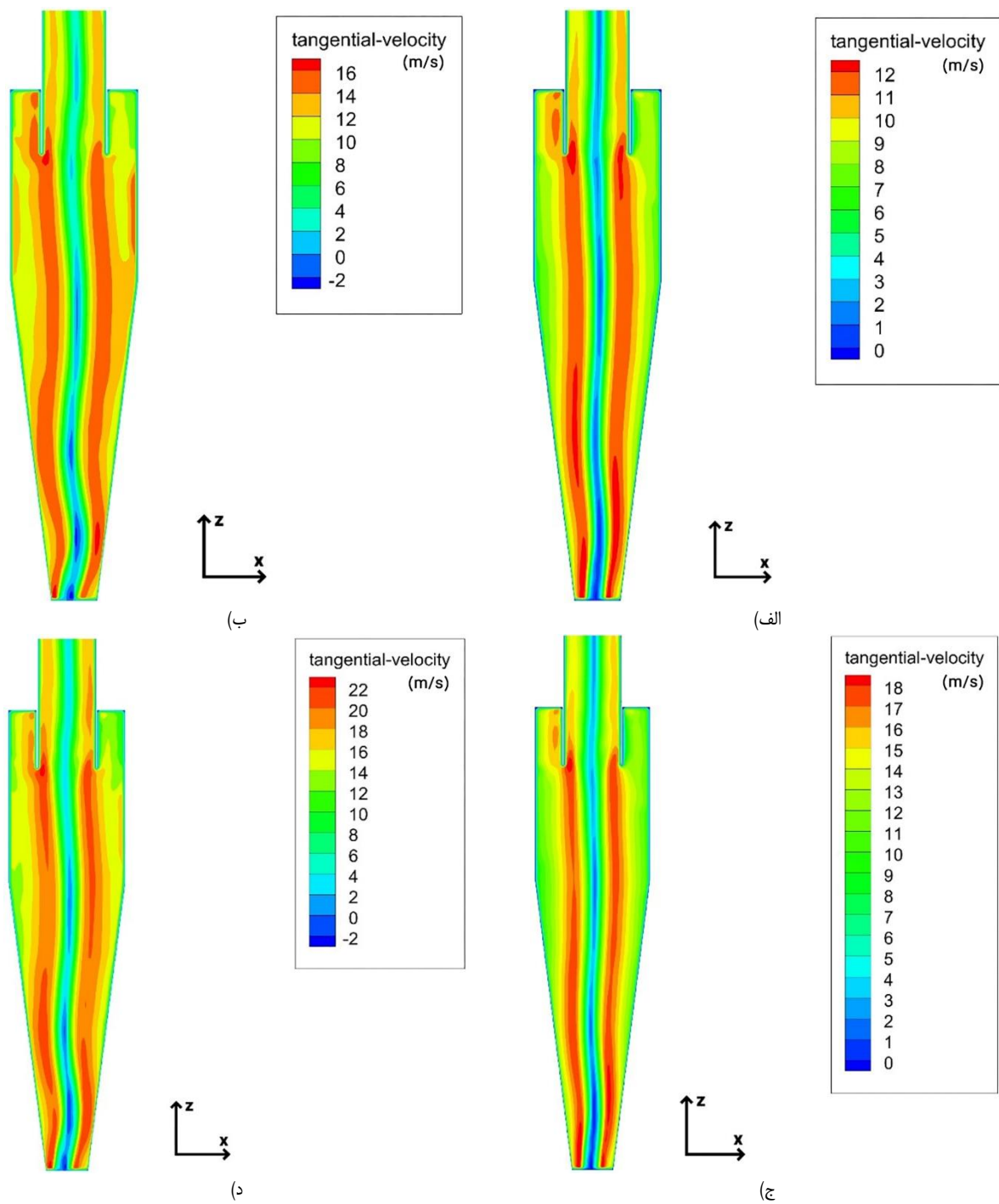
به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه در عملکرد جداسازی سیکلون، نسبت به حالت بدون محرک پلاسما، افزایش چشم‌گیری داشته است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ورودی جریان به سیکلون از ۷ متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه، اندازه سرعت در نقاط مختلف سیکلون افزایش می‌یابد. در حالیکه سرعت مماسی در اطراف محرک‌های پلاسما نسبت به حالتی که سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه بوده است با سرعت بیشینه سیکلون اختلاف کمتری دارد و این امر ناشی از استفاده از محرک‌های پلاسما با قدرت تولید مومنتم برابر در سرعت‌های ورودی مختلف است. لازم به ذکر است که توزیع سرعت مماسی در هر مقطع از سیکلون از دو ناحیه داخلی و خارجی تشکیل شده است. بخشی از جریان از مرکز سیکلون تا مکانی که سرعت مماسی با شعاع افزایش می‌یابد، ناحیه داخلی می‌نامند. در این ناحیه جریان تقریباً مانند یک جسم جامد می‌چرخد که به آن گرداب اجباری درون سیکلون می‌گویند. در ناحیه خارجی، سرعت مماسی از بیشینه مقدار خود نسبت به شعاع تا دیواره سیکلون کاهش می‌یابد. به گرداب موجود در این بخش گرداب آزاد می‌گویند. این نوع جریان گردابی که متشکل از یک گرداب اجباری و یک گرداب آزاد می‌باشد، معروف به جریان گردابی رانکین می‌باشد. همانگونه که در شکل ۷ (الف) و (ج) مشاهده می‌شود بیشینه سرعت مماسی در حالت بدون حضور محرک‌های پلاسما، تقریباً دو برابر سرعت متوسط ورودی می‌باشد و در بخش استوانه‌ای در فاصله ۰٫۲۵ شعاع نسبت به مرکز سیکلون رخ می‌دهد. در حالیکه بر اساس شکل ۷ (ب) و (د)، حضور محرک‌های پلاسما، موجب افزایش سرعت مماسی در بخش گرداب آزاد، بویژه در موقعیت نصب محرک‌های پلاسما، می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اعمال محرک پلاسما در سیکلون، تأثیر قابل توجهی بر توزیع سرعت مماسی درون سیکلون دارد. لازم به ذکر است که نیروی گریز از مرکز به عنوان عامل اصلی در جمع‌آوری ذرات در سیکلون، وابسته به سرعت مماسی می‌باشد. می‌توان پیش‌بینی نمود که با اعمال محرک پلاسما درون سیکلون و افزایش سرعت مماسی در بخش گرداب آزاد، عملکرد جداسازی سیکلون بهبود می‌یابد.

همچنین توزیع فشار دینامیکی سیکلون در دو حالت در حضور و بدون محرک‌های پلاسما در سرعت‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این شکل واضح است که با افزایش سرعت جریان ورودی به سیکلون، فشار دینامیکی درون سیکلون در هر دو حالت در حضور و بدون حضور محرک پلاسما افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که اعمال محرک‌های پلاسما درون سیکلون تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار

به منظور بررسی تأثیر محرک پلاسما بر عملکرد سیکلون، نتایج به ازای دو سرعت ورودی ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه و ذرات فاز جامد با قطرهای ۱، ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر ارائه شده‌اند. همچنین تأثیر ولتاژ اعمالی، تعداد و چیدمان محرک‌های پلاسما بر عملکرد سیکلون و راندمان جداسازی ذرات بررسی شده است. برای بررسی عملکرد جداسازی سیکلون برای دو حالت با حضور پلاسما و بدون حضور پلاسما و در هر دو سرعت ورودی، تعداد ۸۴۰ ذره در قطره‌های مذکور در بازه زمانی ۲۰ میلی‌ثانیه به سیکلون تزریق شده است. برای حالت بدون پلاسما پس از همگرا شدن حل میدان جریان سیکلون، تزریق ذرات انجام شده و به مدت یک ثانیه ذرات دنبال شده و با توجه به تعداد ذرات جمع‌آوری شده در کف سیکلون، عملکرد جداسازی سیکلون بررسی شده است. به همین ترتیب برای حالت با حضور محرک‌های پلاسما، پس از همگرایی حل میدان جریان سیکلون، محرک‌های پلاسما روشن شده و حل تا همگرایی میدان جریان سیکلون در حضور محرک‌های پلاسما ادامه یافته است و سپس تزریق ذرات انجام شده و این بار نیز به مدت یک ثانیه ذرات دنبال شده‌اند و با توجه به تعداد ذرات جمع‌آوری شده در کف سیکلون، عملکرد جداسازی سیکلون در حضور محرک‌های پلاسما مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نتایج به‌صورت کانتورهای سرعت و فشار، و تعداد ذرات جداسازی شده به عنوان پارامتر نشان‌دهنده راندمان سیکلون ارائه شده‌اند.

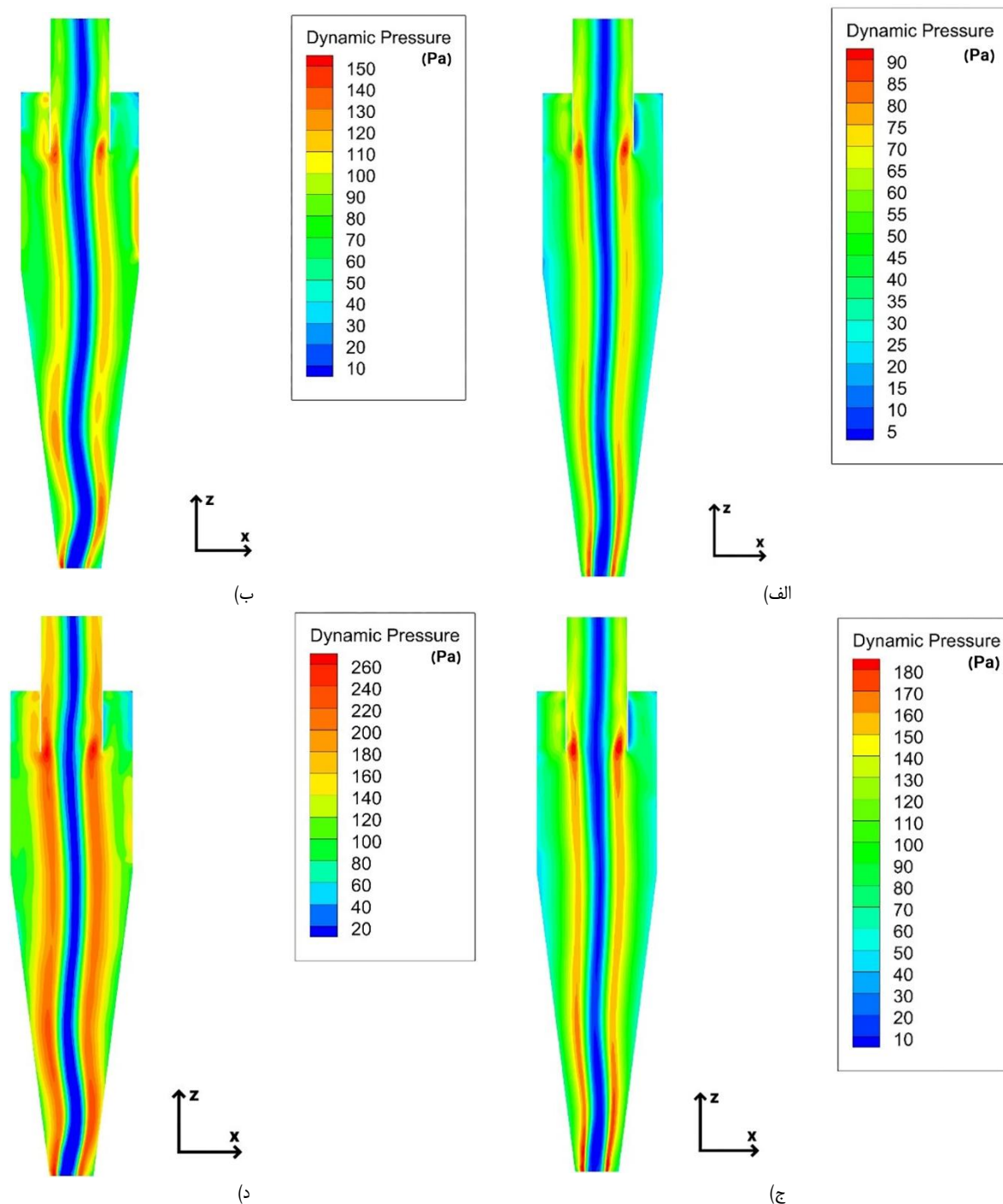
۷-۱- تأثیر محرک پلاسما بر عملکرد سیکلون

جهت بررسی اثر محرک پلاسما بر عملکرد سیکلون، توزیع سرعت مماسی و همچنین توزیع فشار دینامیکی درون سیکلون، از پنج محرک پلاسما با ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلوولت با فاصله ۳ سانتی‌متر از یکدیگر بر روی بخش استوانه‌ای سیکلون استفاده شده است. توزیع سرعت مماسی در دو حالت در حضور و بدون محرک‌های پلاسما در سرعت‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ (الف) و (ج) مشاهده می‌شود میدان جریان بدون حضور محرک‌های پلاسما کاملاً منطبق بر داده‌های تجربی و حل‌های عددی مشابه است و بیشینه سرعت مماسی در سیکلون در میانه شعاع سیکلون رخ می‌دهد. بر اساس شکل ۷ مشخص است که اعمال محرک‌های پلاسما تأثیر قابل توجهی بر میدان جریان سیکلون دارند. نتایج حاکی از آن است که محرک‌های پلاسما با تولید مومنتم در اطراف خود و در جهت جریان سیکلون، موجب افزایش قدرت گردابه‌ها می‌گردند. بر اساس شکل ۷ سرعت مماسی در حضور محرک‌های پلاسما،



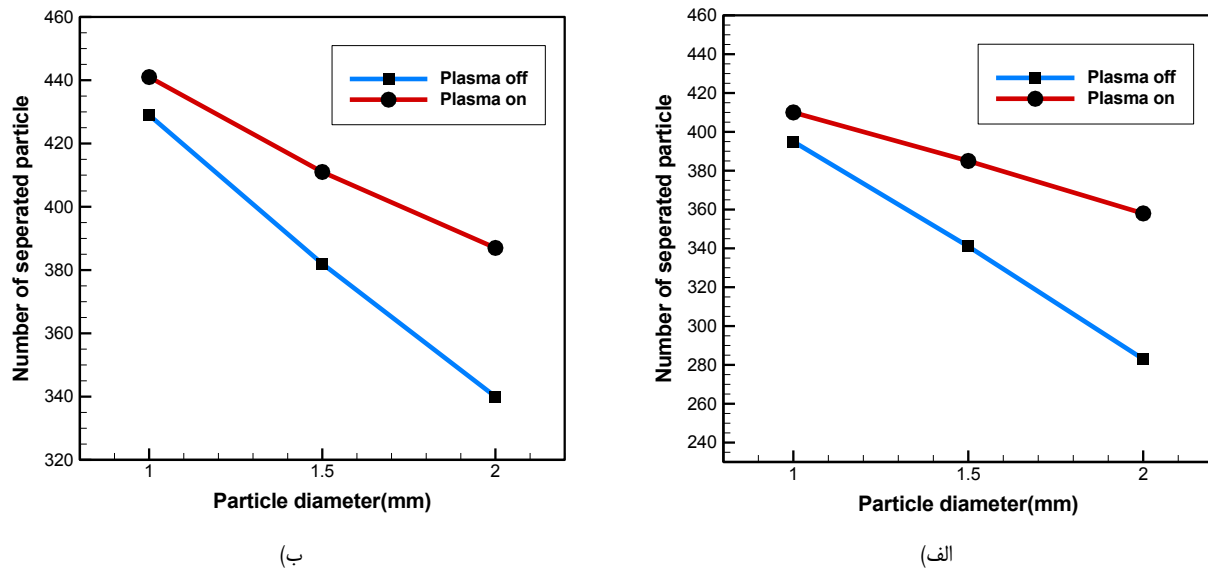
شکل ۷. توزیع سرعت مماسی (الف) بدون حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه (ب) در حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه (ج) بدون حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه (د) در حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه

Fig. 7. Tangential velocity distribution (a) Without the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 7 m/s (b) In the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 7 m/s (c) Without the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 10 m/s (d) In the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 10 m/s



شکل ۸. توزیع فشار دینامیکی (الف) بدون حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه (ب) در حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه (ج) بدون حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه (د) در حضور محرک پلازما در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه

Fig. 8. Dynamic pressure distribution (a) Without the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 7 m/s (b) In the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 7 m/s (c) Without the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 10 m/s (d) In the presence of the plasma actuator at the inlet velocity of 10 m/s



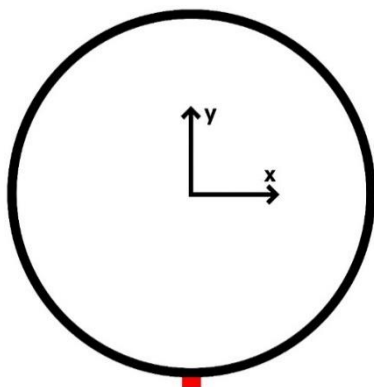
شکل ۹. عملکرد جداسازی سیکلون در قطرهای مختلف ذرات (الف) در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه (ب) در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه

Fig. 9. Cyclone separation performance in various particle diameters (a) at the inlet velocity of 7 m/s (b) at the inlet velocity of 10 m/s

مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۹ (الف)، به ازای سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه، در حضور و بدون حضور محرک پلاسما، به ترتیب تعداد ۴۱۰ و ۳۹۵ ذره با قطر ۱ میلی‌متر از جریان دوفازی جدا شده و در کف سیکلون جمع‌آوری شده است. به عبارت دیگر، اعمال محرک‌های پلاسما در سیکلون موجب جداسازی ۲۵ ذره بیشتر در یک مدت زمان برابر و بهبود ۶ درصدی عملکرد سیکلون شده است. همچنین نتایج حاکی از آن است که به ازای سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه، با افزایش قطر ذرات جامد، عملکرد سیکلون در حضور محرک پلاسما بهبود می‌یابد. به این ترتیب که برای ذرات با قطر ۲ میلی‌متر در حالت بدون حضور محرک پلاسما ۲۸۳ ذره و با حضور محرک‌های پلاسما ۳۵۸ ذره در کف سیکلون جمع‌آوری شده است. به عبارت دیگر استفاده از محرک پلاسما در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و ذرات با قطر ۲ میلی‌متر، موجب بهبود ۲۶٫۵ درصدی عملکرد جداسازی می‌شود. علاوه بر این، بر اساس شکل ۹ (ب)، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت ورودی جریان به سیکلون، عملکرد اعمال محرک پلاسما به سیکلون کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه، استفاده از محرک پلاسما موجب بهبود ۱۳٫۸ درصدی عملکرد جداسازی سیکلون در جمع‌آوری ذرات با قطر ۲ میلی‌متر می‌گردد که نسبت به حالت

دینامیکی در سیکلون دارد و موجب افزایش بیشینه فشار دینامیکی درون سیکلون می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود بیشینه فشار دینامیکی در اطراف محرک‌های پلاسما رخ می‌دهد. بر اساس شکل ۸ (الف) و (ج)، توزیع فشار دینامیکی شبیه به توزیع سرعت مماسی درون سیکلون می‌باشد. به نحویکه به دلیل وجود گرداب اجباری درون سیکلون، فشار در مرکز این گرداب کمترین مقدار را دارد. همچنین مشخص است که بیشینه مقدار فشار دینامیکی در بخش استوانه‌ای در فاصله ۰٫۲۵ شعاع نسبت به مرکز سیکلون رخ می‌دهد. همان‌گونه که هوای در حال چرخش در مسیر خروج از سیکلون، وارد ناحیه استوانه‌ای بالای سیکلون می‌گردد، به دلیل اصطکاک دیواره، فشار دینامیکی کاهش می‌یابد. درحالیکه بر اساس شکل ۸ (ب) و (د)، حضور محرک‌های پلاسما، موجب افزایش فشار دینامیکی می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اعمال محرک پلاسما در سیکلون، تأثیر قابل توجهی بر افزایش فشار موضعی در موقعیت نصب محرک‌ها و همچنین در ناحیه استوانه‌ای بالای سیکلون می‌گردد که موجب افزایش قدرت جریان چرخشی و فشار دینامیکی در این ناحیه می‌شود.

به منظور ارزیابی عملکرد سیکلون، تعداد ذرات جداسازی شده در سیکلون در دو حالت در حضور و بدون محرک‌های پلاسما در سرعت‌های



شکل ۱۰. محل نصب محرک پلازما در صفحه $Z=530$

Fig. 10. Installation location of the plasma actuator on the $Z=530$ plane

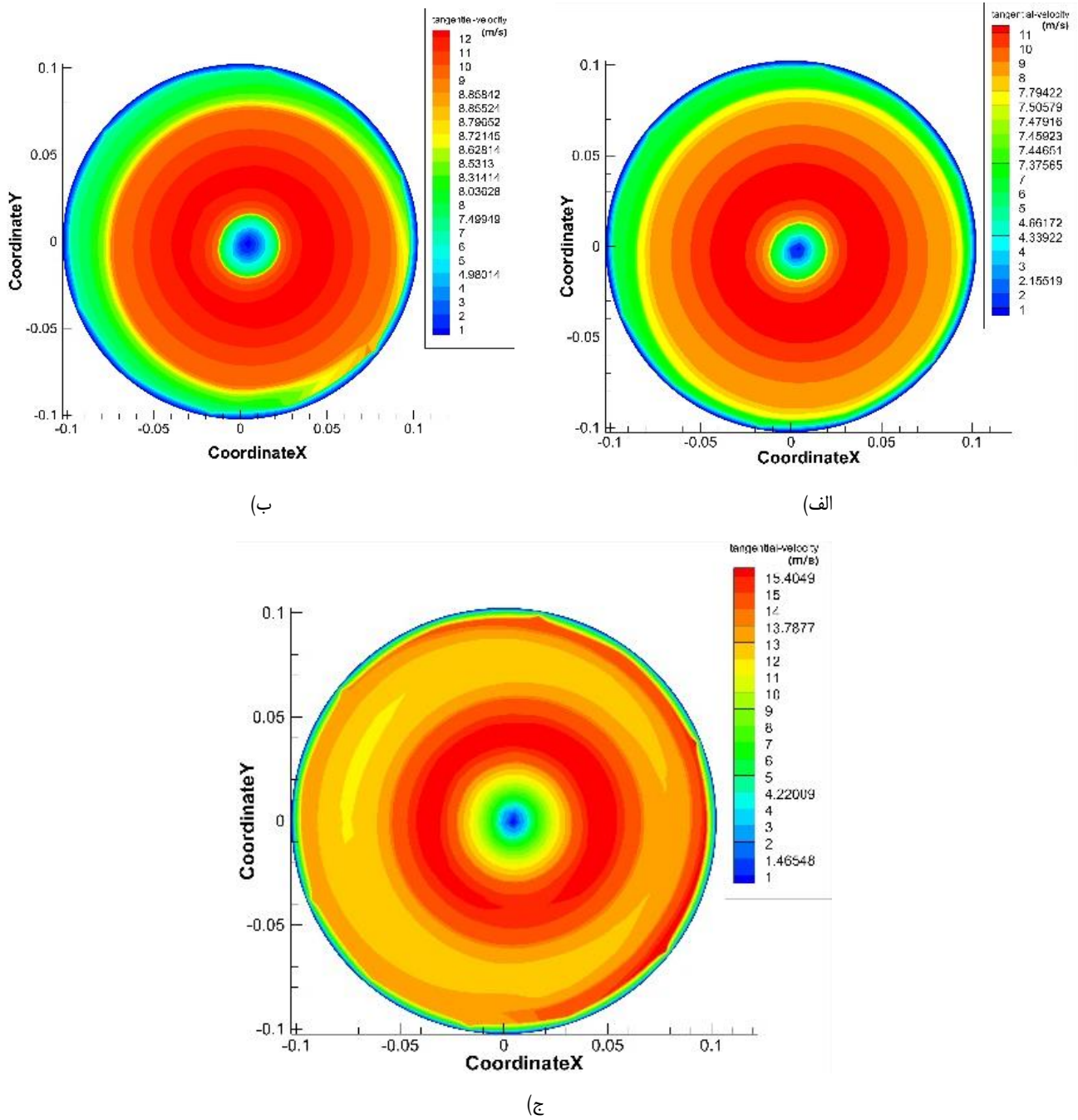
ترتیب در حدود ۱۱، ۱۲ و ۱۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۵ کیلوولت، بیشینه سرعت مماسی در نزدیکی محرک‌های پلازما رخ می‌دهد. براساس این شکل، با افزایش ولتاژ از ۱۰ به ۲۵ کیلوولت، نیروی حجمی ناشی از محرک پلازما افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی حجمی ناشی از محرک پلازما، سرعت القایی ناشی از محرک پلازما نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که، با افزایش ولتاژ اعمالی، که بیشینه سرعت القایی ناشی از محرک پلازما در آن رخ می‌دهد نیز افزایش می‌یابد [۲۶]. بنابراین با توجه به شکل ۱۱ (ج)، با افزایش ولتاژ به ۲۵ کیلوولت، سرعت القایی ناشی از محرک پلازما نسبت به سرعت درون سیکلون افزایش بیشتری می‌یابد به نحوی که جریان القایی ناشی از محرک پلازما، بویژه در ناحیه اطراف محرک پلازما و موقعیتی که بیشینه سرعت القایی در آن رخ می‌دهد، بر جریان گردابی اولیه درون سیکلون غلبه می‌کند. به منظور ارزیابی تأثیر ولتاژ اعمالی محرک پلازما بر عملکرد جداسازی درون سیکلون، تعداد ذرات جامد جمع‌آوری شده در کف سیکلون به ازای ولتاژهای مختلف، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در حالتی که ولتاژ ۱۰ کیلوولت به محرک‌های پلاسمایی اعمال می‌شود، ۳۰۱ ذره در سیکلون جدا شده‌اند و با افزایش ولتاژ اعمال شده به محرک‌های پلاسمایی به ۱۷٫۵ کیلوولت، تعداد ذره از جریان دو فازی جدا شده و در کف سیکلون جمع‌آوری شده است. همچنین در ولتاژ ۲۵ کیلوولت، تعداد ذرات جمع‌آوری شده افزایش چشمگیری داشته و سیکلون توانسته است ۳۵۸ ذره را جدا نماید. نتایج نشان‌دهنده این است که با افزایش

سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه حدود ۱۱٫۸ درصد کاهش یافته است. همچنین نتایج حاکی از آن است که در تمام سرعت‌های ورودی جریان به سیکلون، حضور محرک‌های پلازما موجب بهبود عملکرد سیکلون نسبت به حالت بدون محرک پلازما می‌گردد. علاوه بر این، بر اساس نتایج شکل ۹ مشاهده می‌شود که اعمال محرک پلازما در سرعت‌ها و در قطرهای مختلف ذرات بر روی میدان جریان سیکلون و عملکرد جداسازی سیکلون تأثیر مطلوبی دارد. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که اگرچه عملکرد جداسازی سیکلون در حضور محرک پلازما در تمامی ذرات با قطرهای بررسی شده نسبت به سیکلون بدون حضور پلازما بهتر می‌باشد، اما عملکرد جداسازی سیکلون بر روی قطرهای ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر در حضور محرک‌های پلازما افزایش چشمگیری نسبت به ذرات با قطر ۱ میلی‌متر دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محرک‌های پلازما می‌توانند ضعف سیکلون‌ها در جداسازی ذرات با قطر بزرگ‌تر را جبران کنند و بدین وسیله استفاده از سیکلون‌ها برای جداسازی ذرات با بازه قطرهای بزرگ‌تری را ممکن سازند.

۷-۲- تأثیر ولتاژ اعمالی محرک‌های پلازما بر عملکرد سیکلون

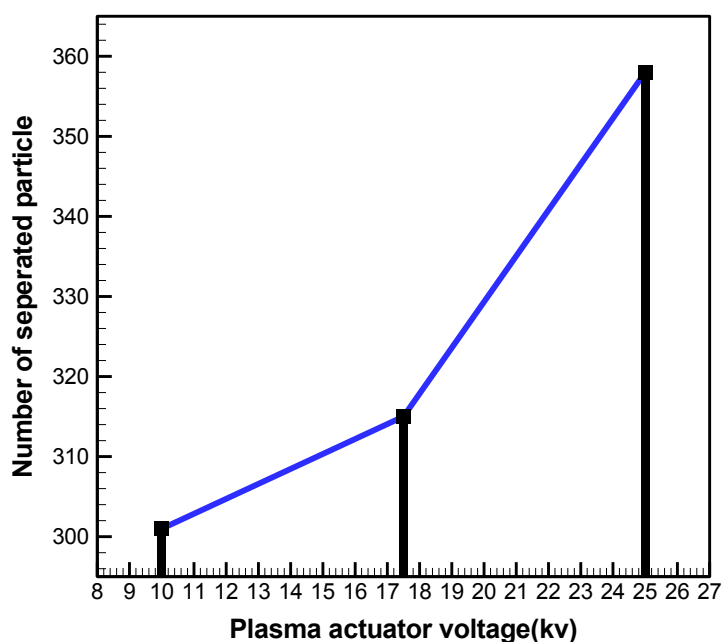
در این بخش تأثیر ولتاژ اعمال شده به محرک‌های پلازما بر توزیع سرعت مماسی و همچنین عملکرد جداسازی سیکلون بررسی شده است. به این منظور از پنج محرک پلاسمایی استفاده شده است که با فاصله ۳ سانتی‌متر از یکدیگر در بخش استوانه‌ای سیکلون نصب شده‌اند. این محرک‌ها تحت ولتاژهای مختلف ۱۰، ۱۷٫۵ و ۲۵ کیلوولت قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که به جز ولتاژ اعمالی، سایر پارامترهای محرک پلازما ثابت هستند. محل نصب یکی از محرک‌های پلازما در ارتفاع ۵۳۰ میلی‌متری سیکلون در شکل ۱۰ با رنگ قرمز بصورت شماتیک نشان داده است.

توزیع سرعت مماسی در قطاعی از سیکلون در صفحه عمود بر محور سیکلون و در ارتفاع ۵۳۰ میلی‌متری که در واقع محل قرارگیری یکی از محرک‌های پلاسمایی است، در سرعت ورودی سیکلون ۷ متر بر ثانیه و قطر ذرات تزریق شده ۲ میلی‌متر، در شکل ۱۱ به ازای ولتاژهای اعمالی مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ اعمالی به محرک پلازما، بیشینه مقدار سرعت مماسی درون سیکلون افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش ولتاژ اعمالی، نیروی حجمی ناشی از محرک‌های پلاسمایی افزایش یافته و موجب افزایش کلی سرعت سیال در سیکلون می‌گردد. همچنین بیشینه سرعت مماسی در ولتاژهای اعمال شده ۱۰، ۱۷٫۵ و ۲۵ کیلوولت به



شکل ۱۱. توزیع سرعت مماسی در صفحه $Z=530$ به ازای ولتاژ (الف) $V=10$ kV (ب) $V=17.5$ kV (ج) $V=25$ kV

Fig. 11. Tangential velocity distribution on the $Z=530$ plane for different applied voltage (a) $V=10$ kV (b) $V=17.5$ kV (c) $V=25$ kV



شکل ۱۲. عملکرد جداسازی سیکلون به ازای ولتاژهای مختلف

Fig. 12. Cyclone separation performance for different applied voltages

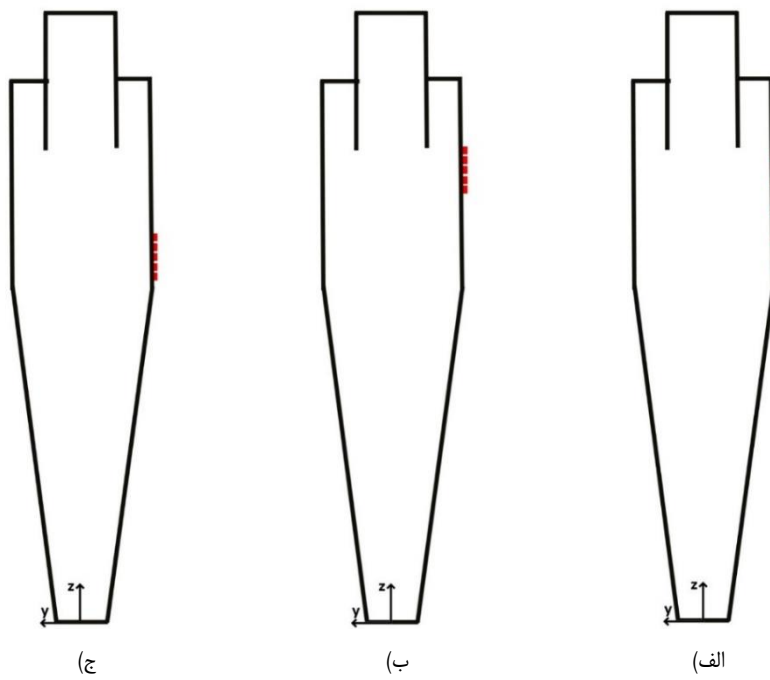
توزیع سرعت مماسی درون سیکلون در ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلوولت، سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و ذرات جامد با قطر ۲ میلی‌متر به ازای آرایش‌های مختلف محرک‌های پلاسما در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، سرعت مماسی در ناحیه اعمال محرک‌های پلاسما در تمام آرایش‌ها به‌صورت موضعی افزایش یافته است. همچنین مشخص است که در آرایش نوع یک، که محرک‌های پلاسما به‌صورت یکنواخت در قسمت استوانه‌ای سیکلون نصب شده‌اند، توزیع سرعت در نزدیکی محرک‌ها یکنواخت‌تر افزایش یافته است. در حالیکه در آرایش‌های نوع دو و سه، سرعت مماسی به‌صورت موضعی و متراکم در اطراف محرک‌ها افزایش یافته است و نسبت به آرایش نوع یک تأثیر کمتری بر کل جریان درون سیکلون دارد.

به منظور ارزیابی تأثیر آرایش‌های مختلف قرارگیری محرک‌های پلاسما درون سیکلون بر عملکرد جداسازی ذرات جامد، تعداد ذرات جدا شده درون سیکلون در ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلوولت، سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و ذرات جامد با قطر ۲ میلی‌متر به ازای آرایش‌های مختلف محرک‌های پلاسما در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آرایش

ولتاژ اعمال شده به محرک‌های پلاسمایی، عملکرد جداسازی سیکلون بهبود خواهد یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محرک‌های پلاسمایی با ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلوولت نسبت به سایر ولتاژهای بررسی شده، دارای عملکرد بهتری در جمع‌آوری ذرات درون سیکلون می‌باشند.

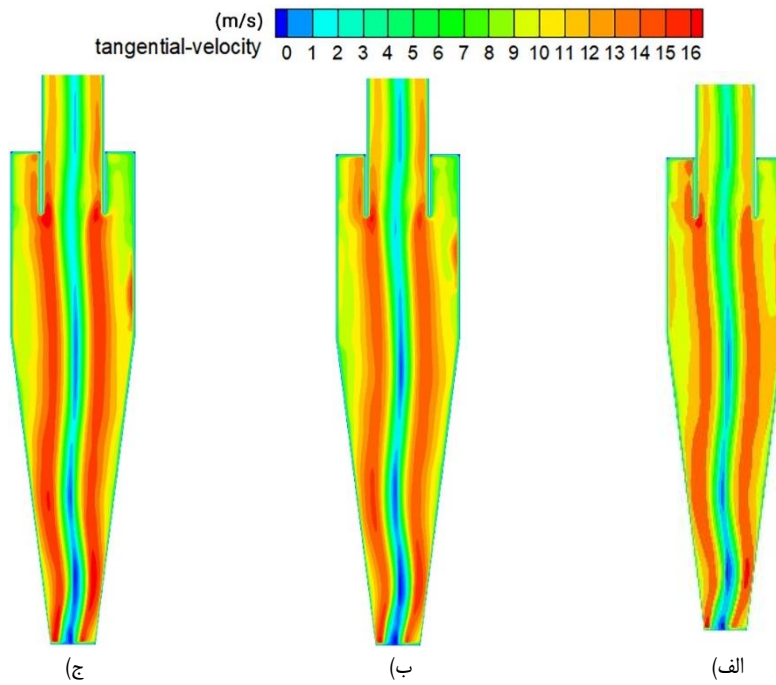
۷-۳- تأثیر آرایش محرک‌های پلاسما بر عملکرد سیکلون

در این بخش، تأثیر آرایش قرارگیری محرک‌های پلاسما در سیکلون بر عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور محرک‌های پلاسما در سه آرایش بر روی بخش استوانه‌ای سیکلون نصب شده‌اند. در آرایش نوع ۱ از پنج محرک پلاسما (که با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند) استفاده شده است که به فاصله سه سانتیمتر از یکدیگر در کل ارتفاع بخش استوانه‌ای سیکلون به طور یکنواخت قرار گرفته‌اند. همچنین در آرایش نوع ۲، پنج محرک پلاسما با فاصله یک سانتیمتر در یک سوم بالایی قسمت استوانه‌ای و در آرایش نوع ۳، پنج محرک پلاسما با فاصله یک سانتیمتر در یک سوم پایینی قسمت استوانه‌ای نصب شده‌اند که هر کدام از آرایش‌ها به‌صورت شماتیک در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



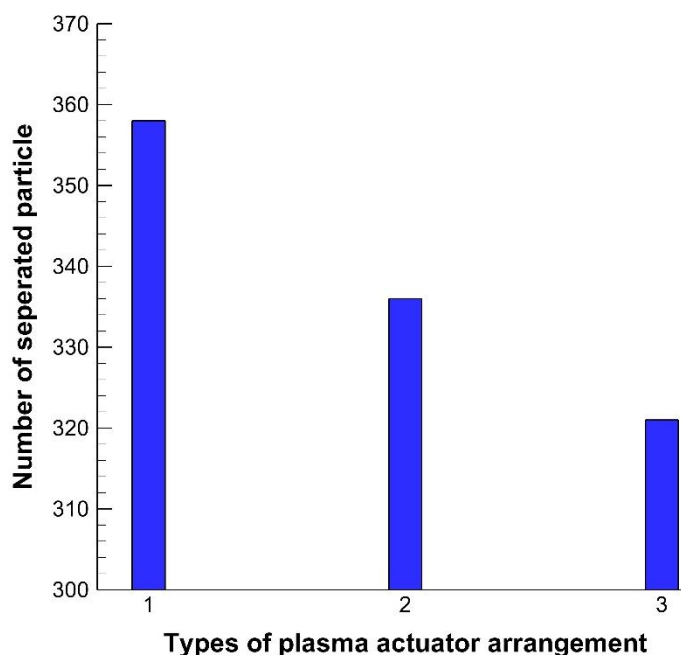
شکل ۱۳. محل نصب محرک‌های پلازما در آرایش (الف) نوع یک (ب) نوع دو (ج) نوع سه

Fig. 13. Installation location of the plasma actuators in arrangement of (a) type one (b) type two (c) type three



شکل ۱۴. توزیع سرعت مماسی به ازای آرایش (الف) نوع یک (ب) نوع دو (ج) نوع سه

Fig. 14. Tangential velocity distribution for arrangement of (a) type one (b) type two (c) type three



شکل ۱۵. عملکرد جداسازی سیکلون به ازای آرایش‌های مختلف محرک‌های پلاسما

Fig. 15. Cyclone separation performance for different arrangements of plasma actuators

تأثیر جریان ثانویه ناشی از محرک‌های پلاسما می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر اینکه اعمال محرک‌های پلاسما تأثیر بسزایی در الگوی جریان و افزایش عملکرد جداسازی ذرات درون سیکلون دارد، نحوه قرارگیری محرک‌های پلاسما درون سیکلون هم به‌طور چشمگیری بر مقدار ذرات جامد جدا شده تأثیر می‌گذارد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر محرک پلاسما بر جریان و عملکرد جداسازی ذرات جامد درون یک سیکلون به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، بهبود عملکرد جداسازی ذرات سیکلون توسط محرک پلاسما است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون ولتاژ اعمالی محرک پلاسما، آرایش محرک‌های پلاسما، سرعت جریان ورودی به سیکلون و اندازه ذرات جامد بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به‌صورت زیر می‌باشد:

- نتایج حاکی از آن است که با حضور محرک پلاسما درون سیکلون در سرعت‌های ورودی مختلف، عملکرد جداسازی سیکلون نسبت به حالت

نوع اول که در واقع استفاده از پنج محرک پلاسما به‌طور یکنواخت در قسمت استوانه‌ای بوده است، دارای بیشترین تأثیر بر بهبود عملکرد جداسازی سیکلون می‌باشد و منجر به جداسازی ۳۵۸ ذره شده است. همچنین در آرایش نوع دوم، که محرک‌های پلاسما در قسمت بالایی استوانه‌ای سیکلون متمرکز شده‌اند، تعداد ۳۳۶ ذره و در آرایش نوع سوم، که تمرکز محرک‌های پلاسما در قسمت پایینی بخش استوانه‌ای سیکلون است، ۳۲۱ ذره از جریان دوفازی جدا شده‌اند. درصد بهبود عملکرد جداسازی ذرات در حضور محرک پلاسما به حالت بدون محرک پلاسما به ترتیب برای آرایش‌های نوع یک تا سه، ۲۶٫۵، ۱۸٫۷ و ۱۳٫۴ درصد می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که پیش‌بینی یکنواخت محرک‌های پلاسما در کل ارتفاع قسمت استوانه‌ای سیکلون می‌تواند بیشترین اثرگذاری را بر عملکرد جداسازی سیکلون داشته باشد. به عبارت دیگر آرایش نوع یک بالاترین راندمان از نظر جداسازی ذرات جامد درون سیکلون را دارد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با یکنواخت‌تر شدن موقعیت محرک‌های پلاسما بر بخش استوانه‌ای سیکلون، تزریق مومنت ناشی از محرک‌های پلاسما، منجر به تقویت یکنواخت جریان چرخشی درون سیکلون می‌گردد و بخش بیشتری از سیکلون تحت

سرعت (m/s)	u_i
سرعت (m/s)	U
ولتاژ اعمالی به محرک پلاسما (kV)	V
مختصات بردار x (m)	x
مختصات بردار y (m)	y
مختصات بردار z (m)	z

علائم یونانی

نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته (W)	\mathcal{E}
ثابت دی‌الکتریک	$d\mathcal{E}$
طول دبای (m)	$d\lambda$
لزجت دینامیکی (kg/m s)	μ
چگالی (kg/m ³)	ρ

منابع

- [1] M. Siadaty, S. Kheradmand, Numerical Simulation of Gas-Solid Cyclone Separators Operating at High Temperatures, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 49(3) (2017) 495-506. (in Persian).
- [2] B. Gopalakrishnan, G.S. Kumar, K.A. Prakash, Parametric analysis and optimization of gas-particle flow through axial cyclone separator: A numerical study, Advanced Powder Technology, 34(2) (2023) 103959.
- [3] M.A. El-Emam, L. Zhou, W.D. Shi, C. Han, True shape modeling of bio-particulate matter flow in an aero-cyclone separator using CFD-DEM simulation, Computational Particle Mechanics, 8 (2021) 955-971.
- [4] C.J. Stairmand, The design and performance of cyclone separators, Trans. Instn. Chem. Engrs., 29 (1951) 356-383.
- [5] K. Elsayed, C. Lacor, Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations, Chemical Engineering Science, 65(22) (2010) 6048-6058.
- [6] Y. Zhu, M. Kim, K. Lee, Y. Park, M. Kuhlman, Design and performance evaluation of a novel double cyclone, Aerosol Science & Technology, 34(4) (2001) 373-380.
- [7] R. Xiang, K. Lee, Exploratory study on cyclones of modified designs, Particulate science and technology, 19(4) (2001) 327-338.

بدون محرک پلاسما افزایش می‌یابد و با کاهش سرعت ورودی، راندمان آن افزایش می‌یابد.

• اعمال محرک‌های پلاسما درون سیکلون، موجب تغییر الگوی جریان هوا درون سیکلون شده و موقعیت بیشینه سرعت مماسی سیکلون نسبت به حالت بدون پلاسما، از میانه شعاع سیکلون به اطراف محرک پلاسما نزدیک می‌شود.

• با افزایش قطر ذرات جامد، عملکرد جداسازی سیکلون در حضور محرک پلاسما، نسبت به سیکلون بدون حضور پلاسما افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که استفاده از محرک پلاسما درون سیکلون می‌تواند موجب افزایش ۲۶٫۵ درصدی عملکرد جداسازی سیکلون نسبت به حالت بدون محرک پلاسما می‌شود.

• با افزایش ولتاژ اعمالی محرک‌های پلاسما، نیروی حجمی ناشی از محرک‌های پلاسمایی افزایش یافته و موجب افزایش بیشینه سرعت مماسی درون سیکلون می‌شود. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ اعمال شده به محرک‌های پلاسمایی عملکرد جداسازی سیکلون بهبود می‌یابد.

• نتایج حاکی از آن است که الگوی جریان و عملکرد جداسازی ذرات درون سیکلون کاملاً به آرایش قرارگیری محرک‌های پلاسما وابسته است، به نحوی که با نصب یکنواخت محرک‌های پلاسما در کل ارتفاع قسمت استوانه‌ای سیکلون (آرایش نوع یک) نسبت به آرایش‌های نوع دو و سه، عملکرد جداسازی ذرات به ترتیب ۷/۸ و ۱۳/۱ درصد افزایش می‌یابد.

۹- فهرست علائم

علائم انگلیسی

ظرفیت خازن	C
قطر ذره (m)	d_p
فرکانس (kHz)	f
نیروی حجمی الکتروهایدرودینامیک (N/m ³)	F_e
شتاب جاذبه (m/s ²)	g
ارتفاع محدوده تشکیل پلاسما (m)	h
طول محدوده تشکیل پلاسما (m)	l
طول الکتروتود (m)	L_e
فشار (N/m ²)	P
زمان (s)	t
ضخامت دی‌الکتریک (m)	t_d
ضخامت الکتروتود (m)	t_e

- [19] F. Qian, J. Zhang, M. Zhang, Effects of the prolonged vertical tube on the separation performance of a cyclone, *Journal of hazardous materials*, 136(3) (2006) 822-829.
- [20] F. Kaya, I. Karagoz, Numerical investigation of performance characteristics of a cyclone prolonged with a dipleg, *Chemical Engineering Journal*, 151(1-3) (2009) 39-45.
- [21] L. Shi, D.J. Bayless, G. Kremer, B. Stuart, Numerical investigation of the flow profiles in the electrically enhanced cyclone, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(4) (2007) 489-496.
- [22] C.-J. Chen, Enhanced collection efficiency for cyclone by applying an external electric field, *Separation Science and Technology*, 36(3) (2001) 499-511.
- [23] A. Darabi, A. Momenimovahed, Numerical simulation of an electro-cyclone for classification of micron-sized particles, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(9) (2022) 1-1. (in Persian).
- [24] H. Jeon, S. Park, Separation of fine particles with electrostatically enhanced cyclone, *Separation Science and Technology*, 55(3) (2020) 575-582.
- [25] J. Zhang, J. Wang, P. Che, Y. Wang, Z. Lu, Z. Qu, Numerical simulation on magnetic confinement characteristics of internal vortex electrostatic cyclone precipitator under different working voltages, *Particuology*, 74 (2023) 156-163.
- [26] N. Amanifard, M. Abdollahzadeh, H. Moayedi, J. Pascoa, An explicit CFD model for the DBD plasma actuators using wall-jet similarity approach, *Journal of Electrostatics*, 107 (2020) 103497.
- [27] H. Moayedi, N. Amanifard, H.M. Deylami, Parametric study of DBD plasma actuator for heat transfer enhancement in flow over a flat plate at low Reynolds numbers, *Journal of Electrostatics*, 124 (2023) 103825.
- [28] J.-S. Yoon, J.-H. Han, Semiempirical thrust model of dielectric barrier plasma actuator for flow control, *Journal of Aerospace Engineering*, 28(1) (2015) 04014041.
- [29] S. Dolati, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, Numerical Investigation of the Effect of Plasma Actuator
- [8] K. Lim, H. Kim, K. Lee, Comparative performances of conventional cyclones and a double cyclone with and without an electric field, *Journal of aerosol science*, 35(1) (2004) 103-116.
- [9] W. Wang, P. Zhang, L. Wang, G. Chen, J. Li, X. Li, Structure and performance of the circumfluent cyclone, *Powder technology*, 200(3) (2010) 158-163.
- [10] H. Yoshida, K. Fukui, K. Yoshida, E. Shinoda, Particle separation by Iinoya's type gas cyclone, *Powder technology*, 118(1-2) (2001) 16-23.
- [11] K. Elsayed, C. Lacor, The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance, *Applied mathematical modelling*, 35(4) (2011) 1952-1968.
- [12] B. Zhao, Y. Su, J. Zhang, Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration, *Chemical Engineering Research and Design*, 84(12) (2006) 1158-1165.
- [13] F. Qian, M. Zhang, Effects of the inlet section angle on the flow field of a cyclone, *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 30(11) (2007) 1564-1570.
- [14] F. Qian, Y. Wu, Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone, *Chemical Engineering research and design*, 87(12) (2009) 1567-1572.
- [15] F.M. Erdal, S.A. Shirazi, Effect of the inlet geometry on the flow in a cylindrical cyclone separator, 128(1) (2006) 62-69.
- [16] Y. Zheng, L. Ni, Numerical study on particles separation using a cyclone enhanced by shunt device: Effects of cylinder-to-cone ratio and vortex finder-to-cylinder ratio, *Powder Technology*, 408 (2022) 117767.
- [17] T. Chuah, J. Gimfun, T.S. Choong, A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics, *Powder technology*, 162(2) (2006) 126-132.
- [18] R. Xiang, S. Park, K. Lee, Effects of cone dimension on cyclone performance, *Journal of Aerosol Science*, 32(4) (2001) 549-561.

- 1104.
- [34] S.K. Shukla, P. Shukla, P. Ghosh, Evaluation of numerical schemes for dispersed phase modeling of cyclone separators, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(2) (2011) 235-246.
- [35] F.O. Thomas, T.C. Corke, M. Iqbal, A. Kozlov, D. Schatzman, Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control, *AIAA journal*, 47(9) (2009) 2169-2178.
- [36] A. Bouchmal, Modeling of Dielectric-Barrier Discharge Actuator: Implementation, validation and generalization of an electrostatic model, TU Delft, Master Thesis, Delft University of Technology, (2011).
- [37] A.J. Hoekstra, Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators, TU Delft, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, (2000).
- on the Film Cooling Effectiveness By Fan-Shaped Hole, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(6) (2019) 1213-1228. (in Persian).
- [30] H. Yazdani, M. Sefid, Power Improvement of a Commercial Large Scale Vertical-Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(3) (2021) 1487-1504. (in Persian).
- [31] K. Adamiak, Quasi-stationary modeling of the DBD plasma flow control around airfoil, *Physics of Fluids*, 32(8) (2020) 085108.
- [32] H. Moayedi, N. Amanifard, Finding a low cost energy multi-DBD plasma actuator for natural heat transfer enhancement in a vertical duct, *Journal of Electrostatics*, 108 (2020) 103520.
- [33] M. Slack, R. Prasad, A. Bakker, F. Boysan, Advances in cyclone modelling using unstructured grids, *Chemical Engineering Research and Design*, 8(78) (2000) 1098-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. H. Karimi, N. Amanifard, H. Moayedi, Numerical investigation of the effect of DBD plasma actuator on performance enhancement of an air-solid particle cyclone separator, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(9) (2023) 1135-1156.

DOI: [10.22060/mej.2023.22312.7601](https://doi.org/10.22060/mej.2023.22312.7601)

