

بررسی عددی اثر تغییر هندسه بر روی الگوی جریان و عملکرد سیکلون گاز-ذره

همواره جداسازی ذرات معلق در جریان سیال مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران بوده است. درون سیکلون‌های گازی جریان پیچیده‌ای با شدت چرخش بسیار بالا حکمفرما می‌باشد که متحمل نرخ تنش-کرنش قابل توجهی است. به دلیل پیچیدگی جریان برای شبیه‌سازی فاز گاز از مدل آشفته RSM و برای ارزیابی عملکرد ذرات کرنات کلسیم از روش آماری اویلری-لاگرانژی استفاده شده است. نتایج عددی هر دو فاز گاز و ذره با مطالعات تجربی مقایسه شده اند. در این مطالعه با تغییر ارتفاع بخش جداسازی در سیکلون تغییر در الگوی جریان و عملکرد آن بررسی می‌شود. با افزایش ارتفاع استوانه سیکلون سرعت مماسی و ناحیه ورتکس کاهش می‌یابند. از سوی دیگر افزایش این پارامتر هندسی موجب افزایش نرخ جریان پایین دست در سرعت محوری، افزایش افت فشار و همچنین افزایش عملکرد سیکلون را به دنبال دارد.

فرزاد پرواز^۱

کارشناسی ارشد

سیدمسعود واحدی^۲

کارشناسی ارشد

احسان اله عصاره^۳

استادیار

محسن خندان^۴

دانشجوی دکترا

واژه‌های راهنما: مدل آشفته RSM، اویلری-لاگرانژی، سیکلون گاز-ذره، جریان آشفته

۱- مقدمه

سیکلون‌ها بطور گسترده در کنترل آلودگی هوا وظیفه جداسازی مخلوط گاز- ذره را به عهده دارند و بطور خاص در صنعت به عنوان افشانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مزایای این تجهیز در صنایع مختلف سادگی نسبی ساخت آن، هزینه عملیاتی پایین و سازگاری با شرایط دشوار صنعتی می‌باشد. امروزه جداسازهای سیکلونی به یکی از مهمترین دستگاه‌های حذف ذرات در زمینه‌های علمی و مهندسی تبدیل شده است. بسیاری از محققین با مطالعه شرایط هندسی سیکلون‌ها تاثیر بسیار زیاد این پارامترها بر عملکرد سیکلون‌ها را گزارش کردند و رسیدن به سیکلون بهینه را مستلزم مطالعه دقیق شرایط هندسی دانسته‌اند [۱-۵]. السید و لاکور [۲] بصورت عددی اثر تغییر ابعاد هندسی سیکلون گازی را مطالعه کردند. آنها دریافتند که تغییرات عرضی ورودی سیکلون نسبت به تغییر ارتفاع ورودی تاثیر بیشتری بر عملکرد سیکلون دارد. ژائو و همکاران [۳] عملکرد دو پیکربندی مختلف سیکلون استیرمند با یک کانال ورودی و دو کانال ورودی را مورد مقایسه

^۱ نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران f.parvaz@semnan.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران m.vahedi@semnan.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول e.assareh@gmail.com

^۴ دانشجوی دکترا، مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران mkhandan@semnan.ac.ir

قرار دادند. نتایج آنها حاکی از آن بود که تعبیه کردن دو ورودی بر روی بدنه سیکلون نه تنها الگوی جریان متقارن تری را به همراه خواهد داشت بلکه در مقایسه با سیکلون تک ورودی عملکرد بالاتری را به دنبال دارد. چوا و همکاران [۴] و ژیانگ و همکاران [۵] تاثیر تغییر ابعاد مخروط سیکلون گازی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که با بزرگتر شدن نسبت ابعاد مخروطی به لوله خروجی بازدهی آن بدون افزایش افت فشار افزایش می‌یابد. کایا و کاراگز [۶] و کیان و همکاران [۷] اثر تغییرات طول مخروط با یک لوله عمودی بر روی بازدهی جمع‌آوری ذرات را مورد مطالعه قرار دادند.

یوشیدا و همکاران [۸] زاویه‌های مختلف نوک مخروطی قرار گرفته شده در بدو ورود جعبه گرد و غبار را بررسی کردند. آنها دریافتند که با کاهش زاویه مخروطی عملکرد سیکلون افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر وجود ضد مخروطی در پایین سیکلون گازی بر عملکرد سیکلون را نیز مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با تعبیه کردن ضد مخروطی در پایین سیکلون در سرعت‌های مماسی پایین شاهد بهبود عملکرد سیکلون خواهیم بود. تغییر شکل و ابعاد قطر لوله خروجی و تاثیر آن بر عملکرد سیکلون توسط بسیاری از محققین مطالعه شده است [۹-۱۱]. تاثیر تغییر ارتفاع سیکلون بر روی الگوی جریان توسط صفی‌خانی و همکاران [۱۱] و هافمن و همکاران [۱۲] بررسی شده است. با افزایش ارتفاع سیکلون افت فشار و سرعت مماسی کاهش می‌یابند و در نتیجه موجب کاهش عملکرد سیکلون در جداسازی ذرات می‌شود. اوسی و کاراگز [۱۳] تاثیر چند پارامتر هندسی را بر الگوی جریان و عملکرد سیکلون گاز-ذره را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش طول لوله خروجی^۱ عملکرد سیکلون را چندان تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. همچنین با بررسی کردن اثرات ارتفاع محدود کننده ورتکس به این نتیجه رسیدند که افزایش آن با افزایش افت فشار و کاهش بازدهی سیکلون همراه است.

السن و وان امن [۱۴] بصورت عددی با استفاده از مدل RSM توزیع سرعت سیال و مسیریابی ذرات در هیدروسیکلون ۲۵۰ میلی‌متری را شبیه‌سازی کردند. آنها تاثیر لوله خروجی را بر روی بازیابی ذرات مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش نرخ سرعت ورودی باعث افزایش سرعت مماسی خواهد شد و بهبود عملکرد سیکلون را به همراه خواهد داشت. کولیوان و همکاران [۱۵] بصورت عددی توزیع فشار و مسیریابی ذرات را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از مدل آشفستگی RSM هسته‌های درون هیدروسیکلون را شبیه‌سازی کردند و دریافتند که بطور مشخص در این هندسه و این جریان اختلاف قابل توجهی بین مدل آشفته RSM و مدل‌های آشفته دو معادله‌ای وجود دارد. نارسیمها و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل آشفستگی k-ε استاندارد اندازه برش ذرات^۲ را شبیه‌سازی کردند. آنها نتایج حاصل از شبیه‌سازی خود را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل آشفته k-ε توانایی شبیه‌سازی افت فشار در دیوار سیکلون را ندارد و مدل مناسبی برای ارزیابی عملکرد سیکلون نمی‌باشد. همچنین این مدل توانایی شبیه‌سازی تنش‌های رینولدزی ناشی از سرعت‌های نوسانی در کنار دیوار سیکلون را ندارد. گاوو و همکاران [۱۷] بصورت عددی با استفاده از مدل آشفستگی RSM تغییر قطر و ارتفاع کانال مرکزی را برای سیکلون گاز-روغن مورد بررسی قرار دادند.

¹ Vortex finder

² Cut off size diameter

نتایج آنها حاکی از آن بود که کاهش قطر کانال مرکزی افزایش افت فشار و سرعت مماسی را به دنبال خواهد داشت. پرواز و همکاران [۱۸] بصورت عددی اثر عدم هم راستایی استوانه خروجی نسبت به بدنه اصلی سیکلون بر روی پارامترهای هیدرودینامیک جریان را بررسی کردند. آنها دریافتند که با فاصله گرفتن از حالت همراستایی لوله خروجی شاهد افزایش سرعت مماسی خواهیم بود. همچنین آنها دریافتند که در صورت اعمال ۱۰٪ غیرهمراستایی، جریان پایین رونده و افت فشار به ترتیب به میزان قابل توجهی کاهش و افزایش می‌یابند. اوه و همکاران [۱۹] الگوهای مختلف جریان و مسیر ذرات را در سیکلون گاز-ذره بررسی کردند. آنها دریافتند که روش اویلری-لاگرانژی یک روش مناسب برای مشخص کردن رفتار ذرات است. همچنین عوامل ابعاد ذرات، سرعت گاز و دمای سیکلون را از جمله عوامل مهم بر رفتار سیکلون دانستند. گاو و همکاران [۲۰] در مطالعه جامع عددی و آزمایشگاهی خود اتفاقاتی که ممکن است برای قطرات و ذرات در برخورد با دیواره سیکلون رخ دهد را بررسی کردند. آنها انرژی برخوردی را مهمترین عامل در پیش بینی این مسئله دانستند. صفی خانی و مهربان [۲۱] جریان آشفته سیال را توسط روش RSM شبیه‌سازی کردند و از روش لاگرانژی برای مسیریابی ذرات استفاده کردند.

نتایج آنها وجود ناحیه کم فشار در بخش مرکزی سیکلون را نشان می‌داد. همچنین آنها دریافتند که انرژی آشفته‌گی جریان در بخش ورودی استوانه خروجی بسیار بالا است. آنها بیان کردند که بازدهی سیکلون با افزایش قطر استوانه خروجی کاهش می‌یابد. السید و لاکور [۲۲] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ آثار گردابه‌های کوچک بر روی الگوی جریان و عملکرد سیکلون گاز-ذره را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که پروفیل‌های سرعت مماسی و محوری برای نه سیکلون با گردابه کوچک با اندازه‌های متفاوت تقریباً رفتار یکسانی دارند.

السید و لاکور [۲۳] اثرات ابعاد ورودی و قطر مخروطی سیکلون بر روی الگوی جریان و عملکرد سیکلون را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که هر دو پارامتر ابعاد ورودی و قطر سیکلون اثرات قابل توجهی بر روی الگوی جریان و عملکرد سیکلون خواهد داشت. گرنلد و درکسن [۲۴] با به کار بردن روش حجم محدود و استفاده از مدل‌های آشفته‌گی دو معادله‌ای LES جریان غیر پایای گاز درون سیکلون را برای شبکه‌های ریز با محدودیت محاسباتی مورد ارزیابی قرار دادند. السید و لاکور [۲۵] با مطالعه سیکلون گاز-ذره توانست نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی خود را بهینه‌سازی کند و کمترین افت فشار را بدست آورد.

در این مطالعه به منظور بررسی اهمیت بخش مخروطی سیکلون از دو پیکربندی با و بدون مخروطی استفاده شده است. به منظور درک هرچه بهتر تغییرات ایجاد شده در الگوی جریان و عملکرد سیکلون در جداسازی ذرات هر یک از پیکربندی‌ها در سه ارتفاع استوانه راهنما مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این مطالعه از مدل RSM برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. همچنین برای بدست آوردن عملکرد هر یک از سیکلون‌های گازی از روش آماری اویلری-لاگرانژی استفاده شده است.

¹ Large Eddy Simulation (LES)

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات انتقال

جریان در سیکلون بصورت سه بعدی با آشفتگی بسیار زیاد است. همچنین این جریان بصورت دما ثابت و تراکم ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. برای چنین جریانی، با میانگین‌گیری رینولدزی معادلات ناویر-استوکس و بقاء جرم بصورت زیر می‌باشند.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial u_i \partial u_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

در رابطه بالا u_i سرعت متوسط، p فشار متوسط، x_i مشخصه طول، ν لزجت سینماتیکی و ρ چگالی گاز می‌باشند. در این قسمت تانسور تنش رینولدز $\overline{u_i u_j}$ به کمک معادلات ناویر-استوکس مدل‌سازی شده است [۱۴].

۲-۲- مدل آشفتگی

در مطالعه حاضر از مدل تنش رینولدزی استفاده شده است. این مدل با استفاده از مدل بسته معادله ناویر-استوکس میانگین‌گیری رینولدزی معادلات انتقال تنش رینولدز را با یک معادله دیگر حل می‌کند. مدل تنش رینولدزی در مقایسه با مدل‌های دو معادله‌ای و تک معادله‌ای توانایی محاسبه انحنای زیاد خطوط جریان، چرخش، و تغییرات سریع کرنش را دارا می‌باشند [۱۴]. معادله انتقال RSM بصورت زیر می‌باشد [۱۷].

$$u_k \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \theta_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

ترم‌های نفوذ D_{ij} ، تولید تنش P_{ij} ، کرنش-فشار θ_{ij} و اضمحلال ε_{ij} بصورت زیر تعریف می‌شوند [۱۷].

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu_t \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

$$\theta_{ij} = \rho \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \quad (7)$$

ناحیه نزدیک دیوار با استفاده از تابع دیوار استاندارد معرفی شده توسط لاندرو اسپالدینگ حل شده است [۱۸]. قانون دیوار استاندارد برای سرعت متوسط بصورت زیر می‌باشد [۱۷].

$$\frac{U c_{\mu}^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho c_{\mu}^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}} y}{\mu} \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق κ ثابت فومن کارمن و E و c_{μ} هر دو ثوابت تجربی هستند. همچنین μ ویسکوزیته سیال، U ، k و y به ترتیب سرعت سیال، انرژی سینتیکی و فاصله عمودی اولین سلول تا دیوار می‌باشد. τ_w تنش برشی دیوار است [۱۷].

۲-۳- معادلات فاز گسسته

با توجه به غلظت پایین ذرات (کسر حجمی کمتر از ۱۰٪) می‌توان چنین فرض کرد که حضور ذرات و تاثیر آنها بر الگوی جریان قابل چشم پوشی است. این شرایط بصورت کوپل یک طرفه^۱ معرفی می‌شود [۱۴]. جهت مسیریابی ذرات از روش لاگرانژی در فاز پیوسته استفاده می‌شود. برای ذره پراکنده معادله تعادل نیرویی وارد بر این ذره بصورت زیر می‌باشد.

$$\frac{du_{pi}}{dt} = F_D(u_i - u_{pi}) + \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} g + F_i \quad (9)$$

در رابطه فوق u_{pi} سرعت ذره، $F_D(u_i - u_{pi})$ نیروی درگ ذره، ρ_p چگالی ذره، g شتاب گرانش و F_i نیروهای جانبی مانند نیروی براونی و نیروی لیفت ساپمن هستند. F_i بصورت نیروی واحد جرم بیان می‌شود. از طرفی برای ذرات کروی نیروی درگ بصورت زیر می‌باشد [۱۴].

$$F_D = \frac{18\nu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (10)$$

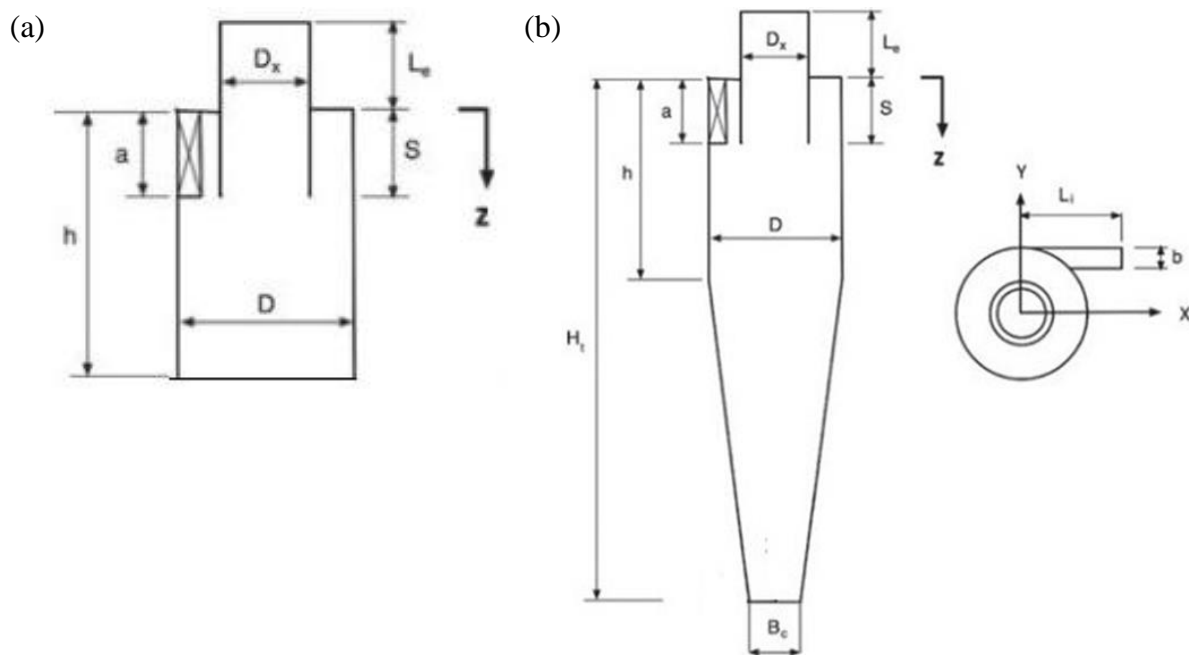
در رابطه (۱۰) d_p قطر ذره و Re رینولدز نسبی می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌شود [۱۴].

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\nu} \quad (11)$$

ضریب درگ وارد بر ذره از طرف گاز در سه ضابطه بصورت زیر بیان می‌شود [۱۴].

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re_p \leq 1 \\ \frac{24(1 + 0.15Re_p^{0.687})}{Re_p} & 1 < Re_p \leq 1000 \\ 0.44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (12)$$

¹ One way coupling



شکل ۱- مشخصات هندسه مسئله

۳- توصیف مسئله

هدف از این مطالعه بررسی اهمیت وجود مخروط بر عملکرد سیکلون می‌باشد. به منظور درک هرچه بهتر تغییرات ایجاد شده در الگوی جریان و عملکرد سیکلون در جداسازی ذرات هر یک از پیکربندی‌ها در سه ارتفاع استوانه راهنما مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پارامترهای هندسی بصورت شماتیک در شکل (۱) ترسیم و مقادیر آنها در جدول (۱) بطور دقیق مشخص شده است.

۴- تولید شبکه

سلول‌های شبکه سازمان یافته بصورت بلوک‌های شش‌وجهی مطابق با شکل (۲) تولید شده‌اند. در قسمت کانال ورودی که جریان بعد از طی کانالی وارد استوانه می‌شود تراکم شبکه بیشتر می‌باشد. دلیل تراکم بیشتر در این ناحیه ایجاد لایه مرزی با گرادیان بسیار زیاد سرعت می‌باشد.

۵- شرایط مرزی

گاز با سرعت $19/5 \text{ m/s}$ بصورت مستقیم و عمود بر مرز ورودی به درون سیکلون وارد می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی و عبارت اضمحلال^۱ آشفتگی بصورت زیر تخمین زده می‌شوند [۱۷].

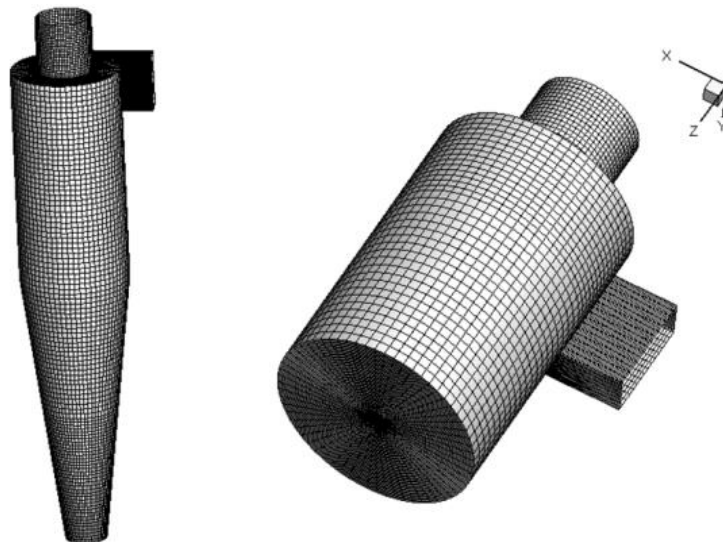
$$k_{in} = \frac{3}{2} I^2 u_{in}^2 ; \varepsilon_{in} = \frac{k_{in}^{3/2}}{0.3 D_H} \quad (13)$$

¹ Dissipation

$$Re_{DH} = \frac{\rho g D_H u_{in}}{\mu} ; I = 0.16 (Re_{DH})^{-0.125} \quad (14)$$

جدول ۱- اندازه ابعاد سیکلون‌های مسئله $D = 205 \text{ mm}$

ابعاد	$\frac{\text{ابعاد}}{\text{قطر}}$
ارتفاع ورودی a/D	۰/۵
عرض ورودی b/D	۰/۲
طول کانال ورودی L_i/D	۰/۷۵
ارتفاع کل سیکلون H_t/D	۰/۸۲
قطر مخروطی B_c/D	۰/۳۷۵
ارتفاع استوانه راهنما h/D در پیکربندی a	۱/۵
	۲
	۲/۵
ارتفاع استوانه راهنما h/D در پیکربندی b	۱/۵
	۲
	۲/۵



شکل ۲- شبکه محاسباتی تولید شده

جدول ۲- خواص فیزیکی کربنات کلسیم [۱۳].

ویسکوزیته دینامیکی [Pa. s]	چگالی [kg/m ³]	خواص فیزیکی
۰/۰۰۰۱۷۶۹۴۰	۱/۲۲۵	هوا
-	۲۷۴۰	کربنات کلسیم

گاز ورودی بعد از پیمودن مسیر گردابه و رسیدن به انتهای سیکلون از طریق لوله خروجی خارج می‌شود و شرط مرزی گاز خروجی بصورت جریان خارج شده^۱ در نظر گرفته می‌شود. بقیه شرایط مرزی بصورت دیوار و با رعایت اصل عدم لغزش اعمال می‌گردند. برای بدست آوردن عملکرد سیکلون کف سیکلون به عنوان تله در نظر گرفته شده است. ذرات پس از برخورد به دیوار سیکلون بازگشت^۲ پیدا می‌کنند. در این مطالعه برخورد ذرات فاز گسسته به دیوار کاملاً الاستیک در نظر گرفته می‌شود از این رو ضریب بازگشت مماسی و عمودی در دیوار بصورت واحد در نظر گرفته شده است [۲۷]. از ذرات کربنات کلسیم با خواص ارائه شده در جدول (۲) در هر یک از سیکلون‌ها استفاده شده است.

۶- روش حل

جریان گاز با استفاده از مدل آشفته RSM، توسط الگوریتم SIMPLE و روش گسسته‌سازی QUICK شبیه‌سازی می‌شود. عبارتهای اضمحلال و انرژی جنبشی آشفتگی بصورت بالادست مرتبه دوم^۳ و عبارت-های تنش رینولدزی بصورت بالادست مرتبه اول^۴ گسسته‌سازی می‌شوند. از آنجا که همگرایی مدل آشفته RSM مشکل می‌باشد. از حل گذرا برای حل پایا در شبیه‌سازی میدان جریان گاز استفاده شده است. در این قسمت به منظور دست یافتن به زمان آسایش از رابطه زیر استفاده شده است.

$$t_{res} = \frac{V}{Q} \quad (15)$$

در رابطه فوق V حجم سیکلون و Q دبی حجمی گاز می‌باشد. گام زمانی استفاده شده برای حل هریک از مدل‌های بررسی شده ۰/۰۰۰۱ ثانیه می‌باشد.

۷- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

پس از ایجاد هندسه و تولید شبکه‌بندی محاسباتی به منظور کسب اطمینان از دقت شبیه‌سازی انجام شده تعداد سلول‌های محاسباتی افزایش می‌یابند و افت فشار کلی و افت فشار استاتیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در مطالعه حاضر به منظور بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه مطابق با جدول (۳) حل مسئله در سه شبکه انجام شده است. در نهایت شبکه با ۵۷۸۳۰۰ سلول با خطای عددی ۰/۴٪ و ۰/۷٪ به ترتیب برای

¹ Out flow

² Reflect

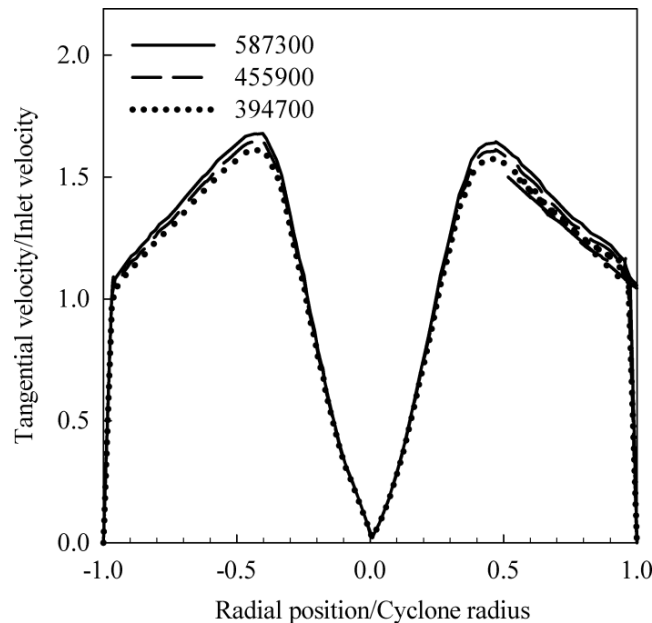
³ Second order upwind

⁴ First order upwind

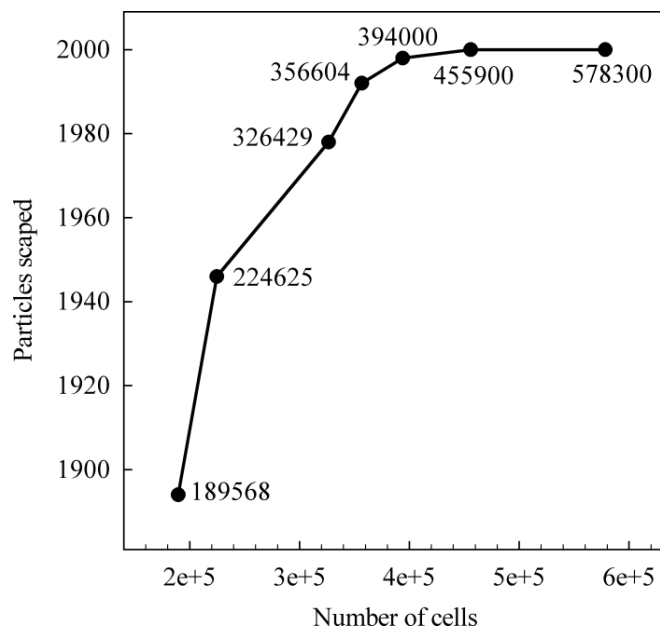
افت فشار کلی و استاتیکی انتخاب می‌شود. اعتبارسنجی سرعت مماسی و بازدهی ذرات برای هر سه شبکه بصورت بصری در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. در شکل (۴) تعداد ذرات خارج شده از سیکلون به عنوان معیاری برای بررسی استقلال نتایج از شبکه انتخاب و ترسیم شده است. اعتبارسنجی نتایج مطابق شکل (۵) از مقایسه پروفیل‌های سرعت مماسی و محوری شبیه‌سازی عددی مطالعه حاضر با داده‌های تجربی هوکسترا [۲۶] انجام شده است. شکل (۶) اعتبارسنجی فاز گسسته حاصل از مقایسه شبیه‌سازی عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی ژائو [۲۸] را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود شبیه‌سازی عددی با دقت قابل قبولی فاز گسسته را حل می‌کند. برای مدل فاز گسسته، ذرات کربنات کلسیم با چگالی نشان داده شده در جدول (۲) بصورت مخلوط با هوا با دبی جرمی 0.0005 kg/m^3 بصورت حجمی از طریق مجرای کانال ورودی وارد محفظه جداسازی سیکلون می‌شوند. ذرات کربنات کلسیم بصورت جامد می‌باشند و عمود بر مقطع کانال ورودی با سرعتی معادل با سرعت هوا به درون سیکلون تزریق می‌شوند.

جدول ۳- جزئیات استقلال از شبکه سیکلون گاز-ذره در مطالعه حاضر

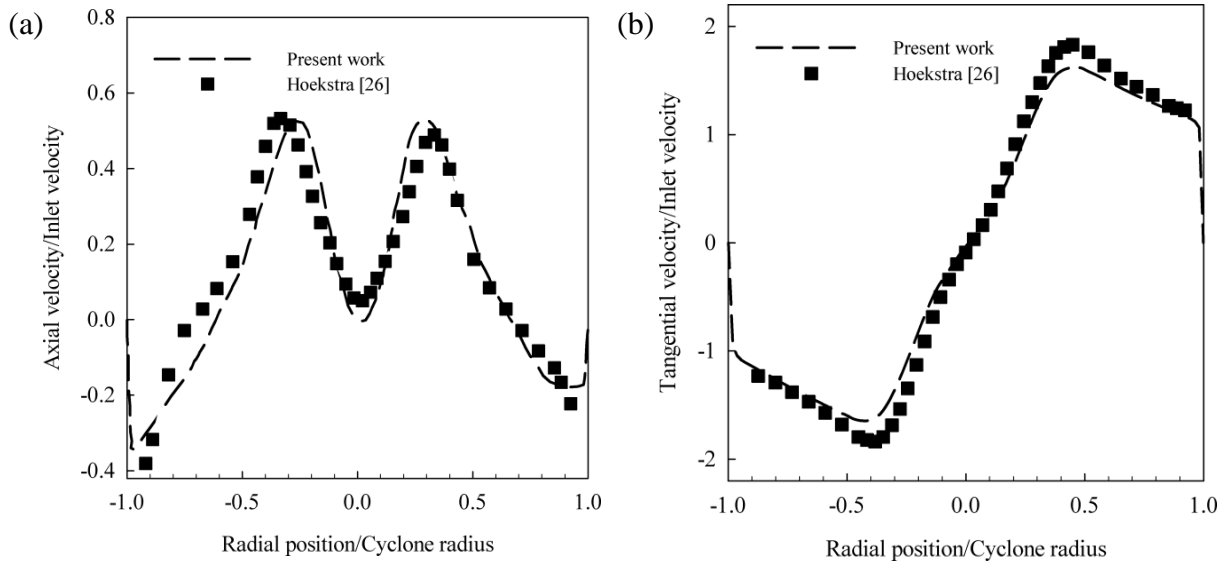
افت فشار کلی (پاسکال)	افت فشار استاتیکی (پاسکال)	تعداد سلول‌ها
۱۱۳۹/۲۸	۱۳۵۵/۴۴	۳۹۴۰۰
۱۱۵۹/۷۷	۱۳۹۸/۹۰	۴۵۵۹۰۰
۱۱۸۸/۴۸	۱۴۵۸/۳۲	۵۷۸۳۰۰
۱/۴	۷/۰۵	اختلاف (درصد)



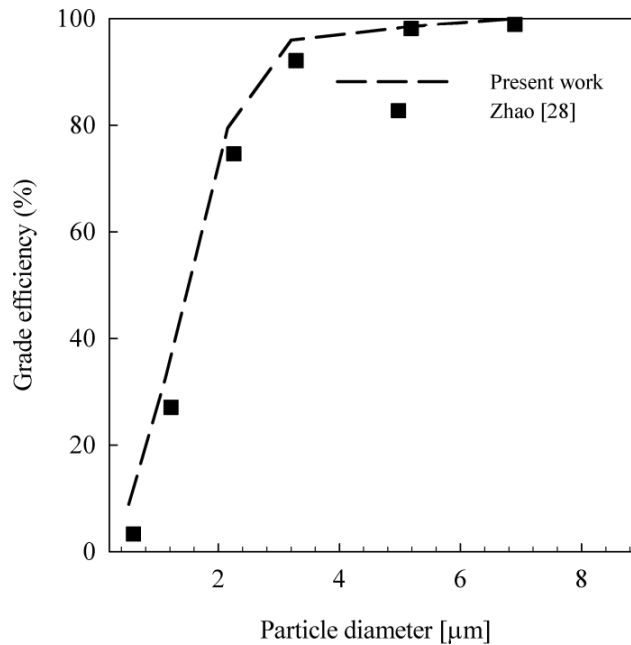
شکل ۳- استقلال از شبکه سرعت مماسی در بخش $z=0.75D$



شکل ۴- استقلال از شبکه حاصل از بررسی تعداد ذرات خارج شده



شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های الف) سرعت محوری و ب) سرعت مماسی حاصل از شبیه‌سازی عددی مطالعه حاضر با مطالعه تجربی هوکسترا [۲۶].



شکل ۶- مقایسه نتایج عددی فاز گسسته شبیه‌سازی مطالعه حاضر با مطالعه تجربی ژائو [۲۸].

۸- نتایج

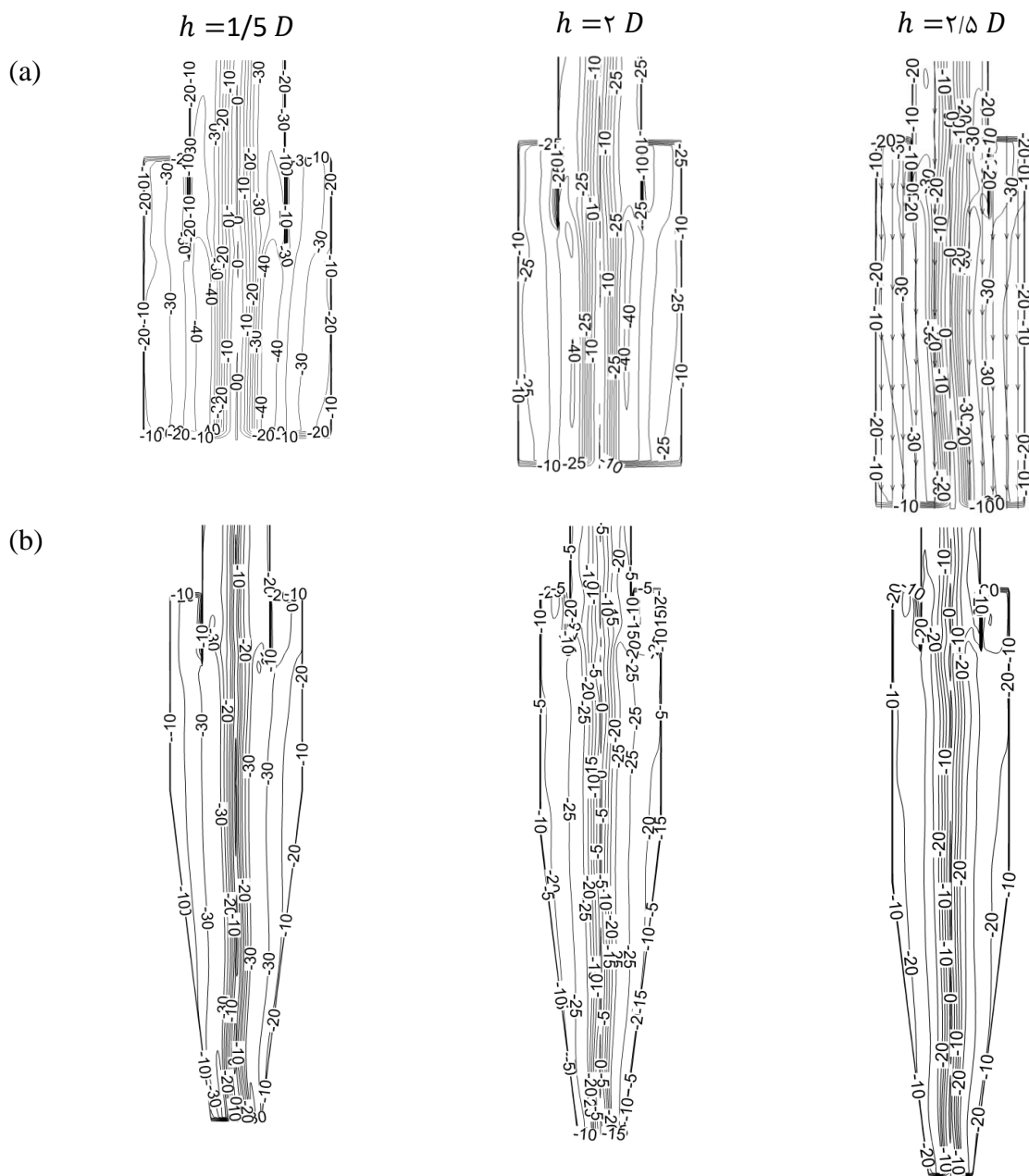
۸-۱- سرعت مماسی

از آنجا که نیرو و شتاب گریز از مرکز بوسیله سرعت مماسی ایجاد می‌شوند بنابراین یکی از مولفه‌های مهم ارزیابی سیکلون الگوی جریان و سرعت مماسی درون سیکلون است. پروفیل سرعت مماسی به دو بخش ناحیه ورتکس اجباری^۱ و ناحیه ورتکس آزاد^۲ تقسیم می‌شود. مجموع این دو بخش پروفیل سرعت مماسی را ورتکس رنکین^۳ می‌نامند. با نزدیک شدن پروفیل سرعت مماسی به سمت دیواره ناحیه ورتکس آزاد به دلیل افزایش تلفات کاهش می‌یابد. با بینش فیزیکی که از سرعت مماسی در سیکلون بیان شد در ادامه برای هر دو پیکربندی با و بدون مخروطی تاثیر تغییر ارتفاع قسمت جداسازی (استوانه راهنما) بررسی می‌شود. با توجه به کانتورهای بدست آمده از شکل (۷) مشخص می‌شود که بطور تقریبی ورتکس اجباری برای مدل‌های بررسی شده یکسان می‌باشند. با مقایسه مدل‌های بررسی شده مشخص می‌شود که اثرات اضافه کردن مخروطی همراه با افزایش ارتفاع محل جدایش موجب کاهش سرعت مماسی می‌گردد. بنابراین با بررسی شکل (8a) که توزیع شعاعی سرعت مماسی را در سه مقطع $s_1 = 0.75 D$ ، $s_2 = 1 D$ و $s_3 = 1.25 D$ مورد ارزیابی قرار می‌دهد مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع محل جداسازی سرعت مماسی کاهش یافته و همین امر موجب کاهش ناحیه ورتکس رنکین می‌شود. میزان کاهش سرعت در حالت عدم استفاده از مخروطی به میزان $1/8$ سرعت ورودی و برای سیکلون‌های معمولی $1/22$ برابر سرعت ورودی می‌باشد.

¹ Forced vortex

² Free vortex

³ Vortex Rankin



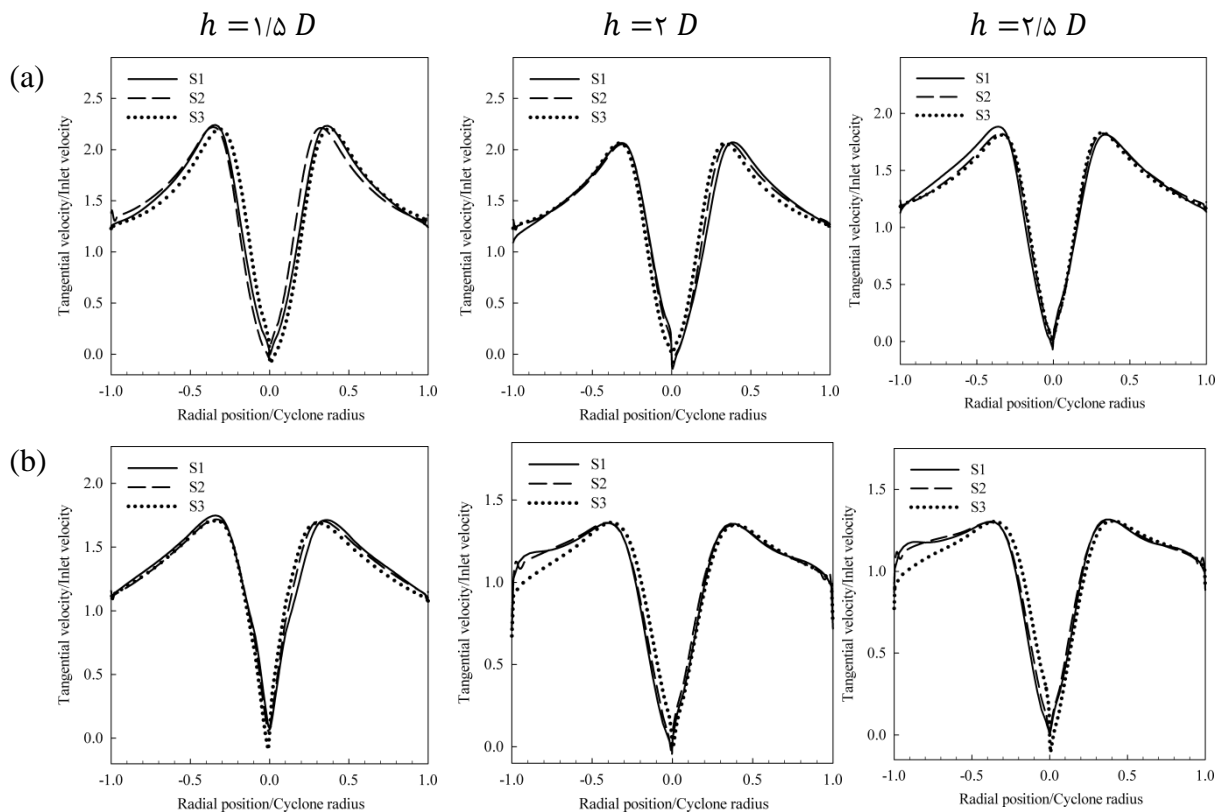
شکل ۷- کانتورهای سرعت مماسی در صفحه $Y=0$ برای سه طول استوانه راهنما با ارتفاع $1/5 D$ ، $2 D$ و $2/5 D$ برای سیکلون الف) بدون مخروط و ب) با مخروط

۸-۲- سرعت محوری

سرعت محوری و شتاب ثقلی در سیکلون وظیفه حمل و جابجایی ذرات را به عهده دارند. کانتورهای سرعت محوری در شکل (۹) به دو جریان پایین دست^۱ به سمت پایین سیکلون و بالادست^۲ در قسمت لوله خروجی در سیکلون اشاره دارند.

^۱ Downward flow

^۲ Upward flow direct

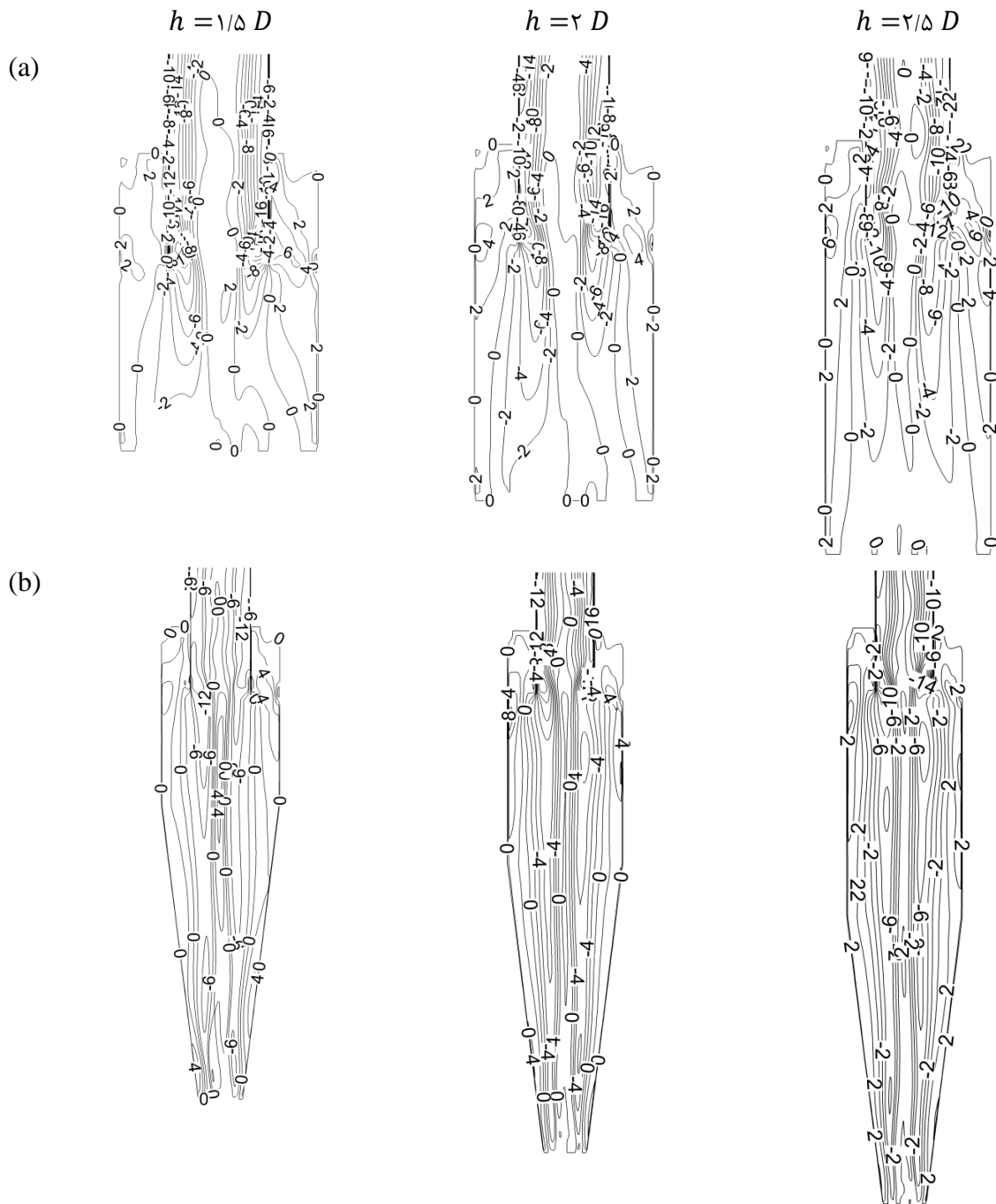


شکل ۸- پروفیل‌های سرعت مماسی در صفحه $Y=0$ برای سه طول استوانه راهنما با ارتفاع $1/5 D$ ، $2 D$ و $2/5 D$ برای سیکلون الف) بدون مخروط و ب) با مخروط.

همانطور که از کانتورهای بدست آمده مشاهده می‌شود در قسمت خروجی کمترین مقدار سرعت محوری مربوط به لوله خروجی و بیشترین سرعت محوری بین دیواره لوله خروجی و دیواره سیکلون می‌باشد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد در جایی که سرعت محوری در دیواره نزدیک صفر است سرعت مماسی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین با افزایش ارتفاع قسمت جداسازی از مقدار سرعت محوری کاسته می‌شود. دلیل این کاهش افت شدت چرخش گاز می‌باشد.

با مشاهده پروفیل‌های شعاعی سرعت محوری از مقایسه شکل‌های (۷) و (۸) با شکل‌های (۹) و (۱۰) ملاحظه می‌شود که پروفیل‌های سرعت شعاعی نسبت به پروفیل‌های سرعت محوری متقارن‌تر می‌باشند. پروفیل‌های سرعت محوری برای هر یک از مدل‌های بررسی شده بصورت شکل دابل‌یو معکوس^۱ می‌باشند.

¹ Inverted W



شکل ۹- کانتورهای سرعت محوری در صفحه $Y=0$ برای سه طول استوانه راهنما با ارتفاع $1/5 D$ ، $2 D$ و $2/5 D$ برای سیکلون الف) بدون مخروط و ب) با مخروط

۹- افت فشار

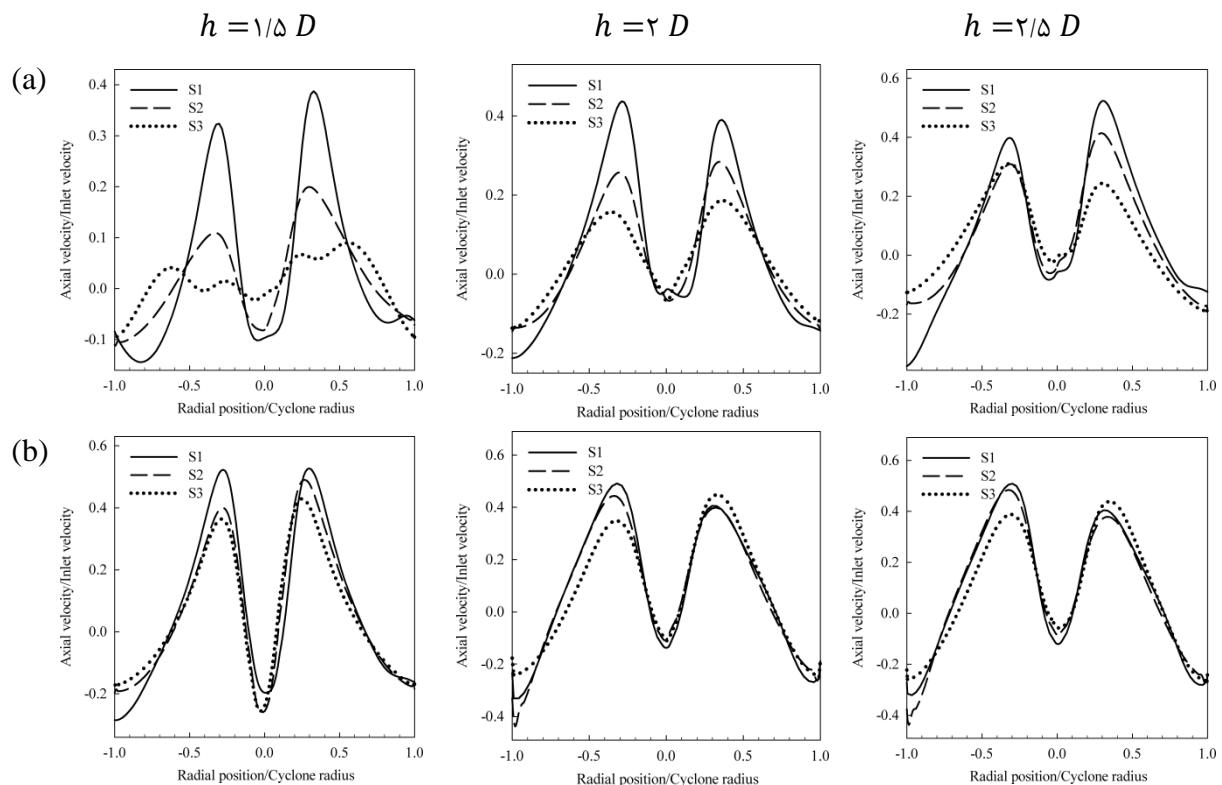
افت فشار در سیکلون در اثر اتلاف انرژی ورتکس می‌باشد که به دلیل وجود اصطکاک بین گاز و ذره ایجاد می‌شود. از آنجا که کاهش افت فشار اثرات منفی بر عملکرد سیکلون دارد بنابراین سعی در کاهش آن توصیه نمی‌شود. به همین دلیل محققان و صنعتگردان بر روی کمینه کردن این پارامتر از لحاظ هندسی تحقیقات زیادی کرده‌اند [۴].

در حالت کلی افت فشار در سیکلون متناسب با هد سرعت می باشد که رابطه آن بصورت زیر تعریف می شود.

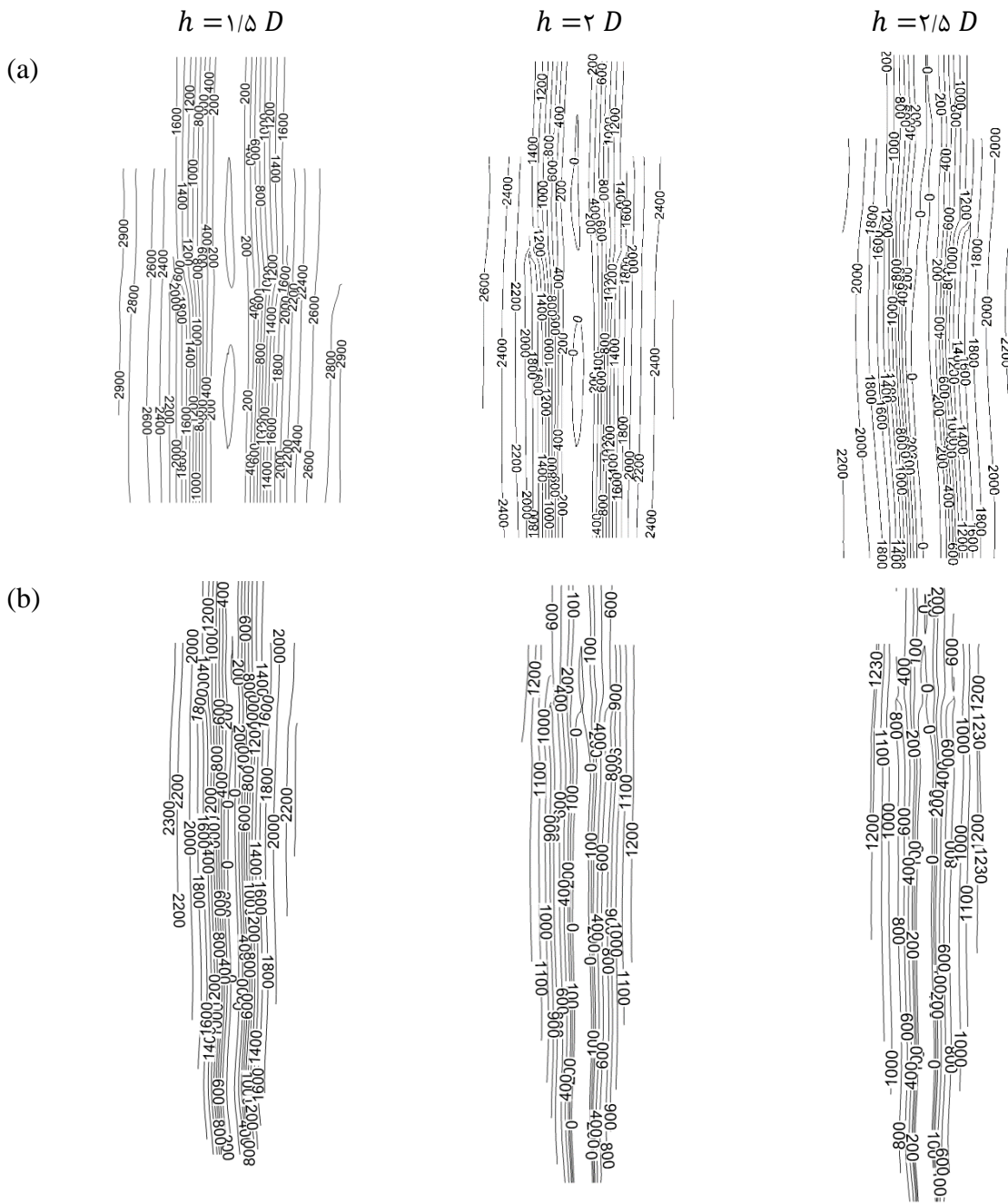
$$\Delta p = \xi \frac{\rho v_{in}^2}{2} \quad (۱۶)$$

در رابطه فوق به ترتیب ρ و v_{in} و ξ چگالی، سرعت ورودی و ضریب افت فشار می باشند. شایان ذکر است که افت فشار استاتیکی در سیکلون بصورت اختلاف فشار ورودی و خروجی بدست می آید. با توجه به شکل (۱۱) ملاحظه می شود که در حالت عدم استفاده از مخروطی با افزایش ارتفاع قسمت جداسازی افت فشار در طول سیکلون کاهش می یابد و بیشترین افت فشار در نواحی نزدیک به دیواره و کمترین افت فشار مربوط به هسته جریان می باشد.

در حالت کلی با مقایسه دو پیکربندی دیده می شود که اضافه کردن مخروطی باعث کاهش افت فشار می شود. همچنین میزان افت فشار با افزایش ارتفاع قسمت جداسازی نیز کاهش می یابد. دلیل کاهش افت فشار در هر دو حالت بررسی شده بدین صورت می باشد که با حرکت جریان از ابتدا تا زمانی که از سیکلون خارج شود افت فشار پویایی خود را از دست می دهد. به همین دلیل در سیکلون های رایج امروزی معمولاً از سیکلون هایی با مخروطی استفاده می کنند تا با افت فشار شدید درون سیکلون مقابله کنند.



شکل ۱۰- پروفیل های سرعت محوری در صفحه $Y=0$ برای سه طول استوانه راهنما با ارتفاع $1/5 D$ ، $2 D$ و $2/5 D$ برای سیکلون الف) بدون مخروط و ب) با مخروط.

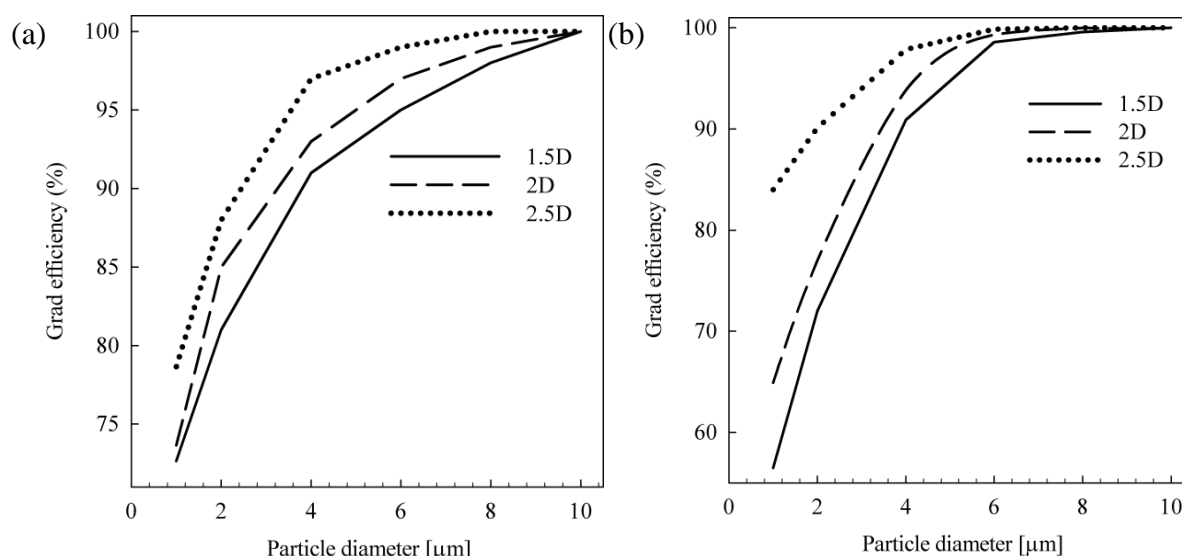


شکل ۱۱- کانتورهای فشار در صفحه $Y=0$ برای سه طول استوانه راهنما با ارتفاع $1/5 D$ ، $2 D$ و $2/5 D$ برای سیکلون الف) بدون مخروط و ب) با مخروط.

۱۰- عملکرد سیکلون گاز- ذره

از جمله شاخص‌های بسیار مهم در ارزیابی عملکرد سیکلون گازی برای صنعتگران بازدهی آن می‌باشد. این شاخص بصورت زیر می‌شود.

$$\eta = \frac{\text{ذرات به دام افتاده}}{\text{کل ذرات ورودی}} \quad (17)$$



شکل ۱۲- عملکرد سیکلون‌های گاز- ذره

با توجه به شکل (۱۲) در هر دو پیکربندی با افزایش ارتفاع عملکرد سیکلون گازی افزایش می‌یابد. از آنجا که با افزایش سرعت محوری ذرات بیشتری به تله می‌افتند، افزایش نرخ جریان پایین دست در اثر افزایش ارتفاع استوانه راهنما باعث افزایش عملکرد سیکلون‌های موجود می‌شود. همانطور که از نمودار بدست آمده ملاحظه می‌شود با افزایش سایز ذرات کربنات کلسیم به مراتب عملکرد جداسازی سیکلون افزایش می‌یابد.

۱۱- نتیجه‌گیری

با توجه به آنکه جریان درون سیکلون جریان بسیار پیچیده و ناهمسانگردی می‌باشد و به مشخصات هندسی بسیار وابسته می‌باشد بنابراین در این مطالعه هندسه سیکلون مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از دو پیکربندی با و بدون ناحیه مخروطی هر یک در سه مقدار ارتفاع استوانه راهنما استفاده شد. برای افزایش دقت شبیه‌سازی و کیفیت بالای نتایج از مدل RSM برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. همچنین برای بدست آوردن عملکرد هر یک از سیکلون‌های گازی از روش آماری اویلری-لاگرانژی استفاده شده است. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

□ با افزایش ارتفاع استوانه راهنما که در جداسازی ذرات بسیار مهم می‌باشد سرعت مماسی ماکزیمم برای هر یک از سیکلون‌های شبیه‌سازی شده کاهش می‌یابد.

□ با افزایش ارتفاع استوانه راهنما سرعت محوری در کنار دیواره‌های سیکلون که وظیفه حمل و انتقال ذرات به سمت لوله خروجی را به عهده دارند کاهش می‌یابد که همین علت موجب کاهش نرخ جریان در سیکلون می‌شود.

□ با افزایش ارتفاع استوانه راهنما در هر دو حالت مشاهده می‌شود که افت فشار کاهش می‌یابد دلیل کاهش افت فشار افزایش اندازه سیکلون می‌باشد زیرا با افزایش ارتفاع استوانه‌ای از شدت پویایی فشار کاسته می‌شود و همین امر موجب اتلاف انرژی کمتری می‌شود.

- عملکرد هر یک از سیکلون‌های بررسی شده نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع قسمت استوانه‌ای عملکرد ذرات کربنات کلسیم با اندازه‌های ۱ الی ۱۰ میکرون افزایش می‌یابد.
- در پیکربندی بدون مخروطی با افزایش ارتفاع بخش جداسازی عملکرد سیکلون کاهش می‌یابد و برای $h = 1/5D$ بازده آن نسبت سیکلون معمولی بیشتر می‌باشد.

مراجع

- [1] Alexander, R. M., "Fundamentals of Cyclone Design and Operation", in Proc. Aust. Inst. Min. Met, Vol. 152, No. 3, pp. 152-153, (1949).
- [2] Elsayed, K., and Lacor, C., "The Effect of Cyclone Inlet Dimensions the Flow Pattern and Performance", Applied Mathematical Modelling, Vol. 35, No. 4, pp. 1952-1968, (2011).
- [3] Zhao, B., Su, Y., and Zhang, J., "Simulation of Gas Flow Pattern and Separation Efficiency in Cyclone with Conventional Single and Spiral Double Inlet Configuration", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 84, No. 12, pp. 1158-1165, (2006).
- [4] Chuah, T. G., Gimbun, J., and Choong, T. S. Y., "A CFD Study of the Effect of Cone Dimensions on Sampling Aerocyclones Performance and Hydrodynamics", Powder Technol., Vol. 162, pp. 126-132, (2006).
- [5] Xiang, R., Park, S. H., and Lee, K. W., "Effects of Cone Dimension on Cyclone Performance", Journal of Aerosol Science, Vol. 32, No. 4, pp. 549-561, (2001).
- [6] Kaya, F., and Karagoz, I., "Numerical Investigation of Performance Characteristics of a Cyclone Prolonged with a Dipleg", Chemical Engineering Journal, Vol. 151, No. 1, pp. 39-45, (2009).
- [7] Qian, F., Zhang, J., and Zhang, M., "Effects of the Prolonged Vertical Tube on the Separation Performance of a Cyclone", Journal of Hazardous Materials, Vol. 136, pp. 822-829, (2006).
- [8] Yoshida, H., Nishimura, Y., Fukui, K., and Yamamoto, T., "Effect of Apex Cone Shape on Fine Particle Classification of Gas-cyclone", Powder Technology, Vol. 204, No. 1, pp. 54-62, (2010).
- [9] Khalkhali, A., and Safikhani, H., "Engineering Optimization Pareto Based Multi-objective Optimization of a Cyclone Vortex Finder using CFD, GMDH Type Neural Networks and Genetic Algorithms", Engineering Optimization, Vol. 44, No. 1, pp. 105-118, (2011).
- [10] Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., and Ebrahimi, R., "Numerical Simulation and Optimization of Fluid Flow in Cyclone Vortex Finder," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 47, No. 1, pp. 128-137, (2008).
- [11] Safikhani, H., Akhavan-Behabadi, M. A., Shams, M., and Rahimyan, M. H., "Numerical Simulation of Flow Field in Three Types of Standard Cyclone Separators", Advanced Powder Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 435-442, (2010).

- [12] Hoffmann, A. C., De Groot, M., Peng, W., Dries, H. W. A., and Kater, J., "Advantages and Risks in Increasing Cyclone Separator Length", *AIChE Journal*, Vol. 47, No. 11, pp. 2452–2460, (2001).
- [13] Avci, A., and Karagoz, I., "Effects of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, pp. 937–955, (2003).
- [14] Olson, T. J., and Van Ommen, R., "Optimizing Hydrocyclone Design using Advanced CFD Model", *Minerals Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 713–720, (2004).
- [15] Cullivan, J. C., Williams, R. a., Dyakowski, T., and Cross, C. R., "New Understanding of a Hydrocyclone Flow Field and Separation Mechanism from Computational Fluid Dynamics", *Minerals Engineering*, Vol. 17, pp. 651–660, (2004).
- [16] Narasimha, M., Sripriya, R., and Banerjee, P. K., "CFD Modelling of Hydrocyclone—Prediction of Cut Size", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 75, No. 1, pp. 53–68, (2005).
- [17] Gao, X., Chen, J., Feng, J., and Peng, X., "Numerical Investigation of the Effects of the Central Channel on the Flow Field in an Oil–gas Cyclone Separator", *Computers & Fluids*, Vol. 92, pp. 45–55, (2013).
- [18] Parvaz, F., Hosseini, S.H., Ahmadi, G., and Elsayed, K., "Impacts of the Vortex Finder Eccentricity on the Flow Pattern and Performance of a Gas Cyclone", *Separation and Purification Technology*, Vol. 187, pp. 1-18, (2017).
- [19] Oh, J., Choi, S., and Kim, J., "Numerical Simulation of an Internal Flow Field in a Uniflow Cyclone Separator", *Powder Technology*, Vol. 274, pp. 135-145, (2015).
- [20] Gao, X., Chen, J., Feng, J., and Peng, X., "Numerical and Experimental Investigations of the Effects of the Breakup of Oil Droplets on the Performance of Oil–gas Cyclone Separators in Oil-injected Compressor Systems", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, No. 7, pp. 1894-1904, (2013).
- [21] Safikhani, H., and Mehrabian, P., "Numerical Study of Flow Field in New Cyclone Separators", *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 379-387, (2016).
- [22] Elsayed, K., and Lacor, C., "The Effect of Cyclone Vortex Finder Dimensions on the Flow Pattern and Performance using LES", *Computers & Fluids*, Vol. 71, pp. 224-239, (2013).
- [23] Elsayed, K., and Lacor, C., "Numerical Modeling of the Flow Field and Performance in Cyclones of Different Cone-tip Diameters", *Computers & Fluids*, Vol. 51, No. 1, pp. 48-59, (2011).
- [24] Gronald, G., and Derksen, J.J., "Simulating Turbulent Swirling Flow in a Gas Cyclone: A Comparison of Various Modeling Approaches", *Powder Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. 160-171 (2011).
- [25] Elsayed, K., and Lacor, C., "Optimization of the Cyclone Separator Geometry for

Minimum Pressure Drop using Mathematical Models and CFD Simulations”, Chemical Engineering Science, Vol. 65, No. 22, pp. 6048–6058 (2010).

- [26] Hoekstra, A.J., “Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators”, Ph.D. Thesis, Technical University Delft, Amsterdam, Netherlands, (2000).
- [27] Brar, L.S., Sharma, R.P., and Elsayed, K., “The Effect of the Cyclone Length on the Performance of Stairmand High-efficiency Cyclone”, Powder Technology, Vol. 286, pp. 668-677, (2015).
- [28] Zhao, B., “Development of a New Method for Evaluating Cyclone Efficiency”, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 44, No. 4, pp. 447–451, (2005).

فهرست نمادهای انگلیسی

C_D	: ضریب درگ
D	: قطر سیکلون (m)
F_D	: نیروی اصطکاک (kgm s^{-2})
g	: گرانش (m s^{-2})
K	: انرژی جنبشی نوسانی ($\text{kgm}^2 \text{s}^{-2}$)
\bar{p}	: فشار متوسط (Pa)
P	: تولید تنش ($\text{kgm}^{-1} \text{s}^{-2}$)
Q	: دبی حجمی ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
R_{ij}	: تانسور تنش رینولدزی ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
S_i	: مقطع مورد بررسی (m)
t_{res}	: زمان استراحت ذره (s)
u	: سرعت سیال در جهت x (m s^{-1})
u'	: مولفه نوسانی سرعت (m s^{-1})
\bar{u}	: سرعت متوسط (m s^{-1})
v	: سرعت سیال در جهت y (m s^{-1})
V	: حجم سیکلون (m^3)
w	: سرعت سیال در جهت z (m s^{-1})
x_i	: موقعیت مکانی (m)

نمادهای یونانی ν : لزجت سینماتیکی ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) ν_t : لزجت آشفتگی ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) ρ : چگالی (kg m^{-3}) ε : نرخ اتلافات آشفتگی μ : ویسکوزیته دینامیکی (Pa s)**زیرنویس‌ها** i : شمارنده جهت مختصات j : شمارنده جهت مختصات p : ذره t : آشفتگی

Abstract

Separation of suspended particles in a mixture of gas-particle fluids is always one of the most important topics among researchers and artisan. Despite the fact that gas cyclones have simple geometry, there is a complex flow with high anisotropy. Hence, In order to simulate such flow a good physical understanding is needed. In addition to high rotation intensity, there is also a high rate of stress-strain, so RMS turbulent model was used to study the gas phase behavior and Eulerian-Lagrangian statistical method was applied to evaluate the performance of calcium carbonate particles.

The numerical results of gas phase as well as particle phase has been validated with experimental data. Following results were obtained through the studying of separation part height effects on cyclone: With increase in height of the separation part of the cyclone for both cases, it is observed that the tangential velocity declines. Moreover, it decreases the Vertex Rankin area. On the other hand, it can be concluded that, the increase of this geometric parameter will rise the downstream flow rate in axial velocity. Therefore, the increase in height of the cylindrical cyclone results in pressure drop increment and improve the performance of the cyclone.