

بررسی اثرات تغییر قطر لوله خروجی آئروسیکلون بر عملکرد آن در جریان دو فاز گاز و قطره

فرزاد پرواز

روح اله رفعی*

فرهاد طالبی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این پژوهش، اثرات کوچک کردن قطر خروجی آئروسیکلون بر عملکرد آن مورد بررسی قرار می گیرد. برای پیش بینی راندمان جداسازی قطرات و الگوی جریان درون آئروسیکلون از مدل آشفتگی تنش رینولدزی (RSM) استفاده شده است. روش عددی استفاده شده در کار حاضر روش اویلری-لاگرانژی بوده است. به دلیل انحراف هسته گرا، حل انجام گرفته به صورت ناپایا و در مدت زمان 0.73 ثانیه صورت می گیرد. با کوچک شدن قطر خروجی افت فشار و سرعت مماسی افزایش می یابد. همچنین با کاهش قطر لوله خروجی (به عنوان مثال در سرعت 10 متر بر ثانیه) عدد اویلر افزایش می یابد. با افزایش عدد رینولدز، عدد اویلر تقریباً به صورت ثابت باقی می ماند. اثرات عبارت انعکاسی دیواره در مدل آشفته RSM بر میدان جریان و حرکت قطرات بررسی شده است. با اعمال کردن عبارت انعکاسی دیواره نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که سیکلونها با قطر خروجی کوچکتر بازدهی بیشتری نسبت به دیگر سیکلون ها دارند.

واژه های کلیدی: آئروسیکلون، اویلری-لاگرانژی، عدد اویلر، تغییر قطر خروجی، پاشش قطرات.

Effects of the Outlet Pipe Diameter on the Performance of Aerocyclone in Gas Droplet Two-Phase Flow

F. Parvaz

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

R. Rafee

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

F. Talebi

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In this study, effects of the aerocyclone outlet diameter on its performance are studied. The Reynolds Stress Model (RSM) model has been used in order to predict the turbulent flow patterns inside the aerocyclone and its droplet removal efficiency. The Eulerian-Lagrangian method was used for gas droplet flow simulations. Due to the precessing vortex core (PVC), unsteady simulation of the flow is performed for duration of 0.73 s. The results show that for smaller diameter of the outlet pipe, the gas flow pressure loss and tangential velocity are increased. Also, by decreasing the outlet diameters of aerocyclone (e.g. at the velocity of 10m/s) the Euler number increases. Increasing in the velocity can change the Euler number significantly. The wall reflection term effects (in RSM model) on the flow field and droplet trajectories are studied. By implementation of wall reflection effects, the numerical results approach to the experimental data. The simulation results show that the cyclones with the smaller outlet diameter has the higher efficiencies at different velocities than others.

Keywords: Aerocyclone, Eulerian-Lagrangian Method, Euler Number, Outlet pipe Diameter, Droplet Splashing.

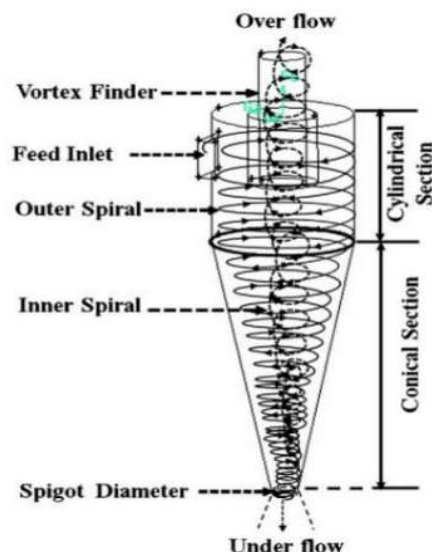
۱- مقدمه

در قرن نوزدهم جداسازهای آئروسیکلون توسعه داده شدند. با توجه به محبوبیت این وسیله در خیلی از صنایع، جداسازی ذرات از جریان های گازی به کمک آن انجام می شود. مهمترین مزایای آنها عبارتند از: فقدان اجزاء متحرک، کمترین سرمایه گذاری برای نگهداری آنها، قابلیت اعتماد بالا حین عملکرد آنها در دما و فشار خیلی زیاد [۱]. سیکلون های متداول شامل استوانه و مخروطی می باشد که کانالی با موقعیت مماسی به آن متصل شده است. در سیکلون لوله خروجی به

گردیاب^۱ معروف می باشد. جریان گاز داخل سیکلون با سرعت مماسی خیلی بالا شروع به چرخیدن می کند و چرخش جریان به سمت پایین به نوک مخروطی تمایل دارد و از پایین در جهت عکس جریان به صورت چرخشی به سمت لوله خروجی حرکت می کند که در شکل ۱ به آن اشاره شده است.

روند جداسازی بدین گونه است که در مخزن، گردوغبار از طریق لایه مرزی ایجاد شده در کنار دیواره به سمت نوک مخروطی هدایت می شود. ساختار سیکلون ها خیلی ساده است ولی جریان فیزیکی آنها خیلی پیچیده و بطور طبیعی سه بُعدی هستند [۲].

¹ Vortex finder



شکل ۱- قسمتهای مختلف سیکلون استیرمند [۱]

لخبیر و همکارانش [۳] با بررسی کردن ارتفاع استوانه و ارتفاع مخروطی در سیکلون رایج استیرمند به این نتیجه رسیدند که افزایش طول استوانه تا ۵/۵ برابر قطر سیکلون موجب کاهش ۳۴ درصدی در افت فشار و افزایش راندمان تا ۹/۵ درصد می شود. از طرفی افزایش طول مخروط تا ۶/۵ برابر قطر سیکلون، افت فشار را ۲۹ درصد و راندمان را ۱۱ درصد افزایش می دهد. ژائو و همکارانش [۴] با استفاده از نرم افزار فلوئنت^۱ میدان جریان و بازدهی دو نوع سیکلون تک ورودی و دو ورودی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش عرض کانال های دو ورودی بازدهی بهتری بدست می آید. یانگ و همکارانش [۵] با استفاده از مدل آشفته RSM پارامترهای موثر کانال مرکزی را بر روی میدان جریان گاز-روغن که در سیستم های کمپرسور کاربرد دارند، بررسی کردند. در جداسازهای روغن از گاز، متوسط سرعت های مماسی نزدیک دیوار تقریباً $1-0.8$ برابر سرعت ورودی است. ماکزیمم سرعت مماسی تقریباً $2-1.8$ برابر سرعت ورودی می باشد. به علاوه اثرات فضای حلقوی بالا مورد بررسی قرار گرفته است. جریان ذرات گاز در سه نوع سیکلون توسط شی و بیلز [۶] به صورت عددی مدل سازی شد. آنها اثرات شرایط مرزی را با داده های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. بویسان و همکارانش [۷] از پیشگامان مطالعات عددی در زمینه سیکلون های گازی بوده اند. هروات و همکارانش نشان دادند که مدل آشفته دو معادله ای $k-\epsilon$ و انواع دیگر آن برای شبیه سازی جریان آشفته چرخشی بالا در سیکلون مناسب نمی باشد [۸]. با توجه به فرض ساختار آشفته ناهمسانگرد جریان و با محاسبه کردن اثرات انحناء، چرخش و تغییرات سریع در کرنش مدل RSM برای شبیه سازی جریان درون سیکلون مناسب است [۹]. هافمن و همکارانش [۱۰] مطالعات آزمایشگاهی بوسیله تغییر طول سیکلون ها انجام دادند. آنها مشاهده کردند که افزایش طول

استوانه به اندازه ۵/۵ برابر قطر سیکلون موجب بهبودی عملکرد و کارایی پارامترها می شود. یانگ و لی [۱۱] اثرات افزایش طول سیکلون با استفاده از شبیه سازی عددی فاز پیوسته مطالعه کردند و آنها گزارش دادند که با افزایش طول سیکلون سرعت مماسی کاهش می یابد. ژو و همکارانش [۱۲] آزمایشهایی برای ارتفاع مختلف سیکلون انجام دادند و دریافتند که ارتفاع سیکلون تغییرات قابل توجهی در بازدهی جداسازی سیکلون دارد. در بیشتر مطالعات آنها افت بازدهی در سیکلون در اثر افزایش طول سیکلون به دلیل کاهش حرکت گاز در مخروطی گزارش شده است که این با نتایج هافمن و همکارانش [۱۰] در تناقض بوده است. آویس و همکارانش [۱۳] مدل های ریاضی را برای محاسبه اندازه برش ذرات^۲ توسعه دادند. همچنین آنها نشان دادند که اصطکاک سطحی و طول ورتکس و رژیم های حاکم بر جریان اثرات مهمی بر عملکرد سیکلون دارند. کپا [۱۴] با استفاده از مدل آشفته RSM سیکلون بزرگ مجهز به ضد مخروطی را مورد بررسی قرار داد. بررسی او شامل تغییرات موقعیت قطر ضد مخروطی بر اساس تحقیقات گذشته بوده است. برای مسیر یابی ذرات درون این نوع از سیکلون از روش لاگرانژی - اویلری استفاده شده است. مدل اعمال شده بطور صحیحی باعث بازگشت جریان و تسهیل در ارزیابی جداسازی ذرات می شود. نتیجه این بررسی بدین صورت می باشد که جابه جا کردن ضد مخروطی در سیکلون باعث بهبود بازدهی و افزایش افت فشار می گردد. سورمن و همکارانش [۱۵] با استفاده از روش های تئوری، اندازه برش ذرات که در ارتباط با هندسه سیکلون و خاصیت سیال است را به دست آوردند.

لی و همکارانش [۱۶] با افزایش طول مخروطی به مقدار دو برابر مدل استیرمند، اثرات قطر استوانه سیکلون بر روی میدان جریان داخل سیکلون را مورد بررسی قرار دادند. آنها پایداری در میدان جریان را برای قسمت مخروطی سیکلون و همچنین جریان توسعه یافته نشده در استوانه را به عنوان یک نتیجه ناپایا در بخش مخروطی گزارش دادند. با توجه به تحقیقات و بررسی هایی که بر روی سیکلون انجام گرفته است. بیشتر این بررسی ها بر روی رفتار ذرات در سیکلون می باشد. یکی از پارامترهایی که در طراحی سیکلون مهم است اندازه قطر خروجی می باشد. هدف از این مقاله، بررسی اثر تغییرات قطر خروجی بر الگوهای جریان درون سیکلون و عملکرد این وسیله صنعتی می باشد. همچنین اثرات عبارت انعکاسی دیواره در مدل تنش رینولدزی و عدم استفاده از آن در پیش بینی نتایج مورد بررسی قرار می گیرد. علاوه بر این در پژوهش حاضر به بررسی امکان پاشش قطرات از فیلم مایع در دیواره سیکلون پرداخته می شود.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات فاز پیوسته

جریان در سیکلون بطور طبیعی سه بُعدی و با آشفتگی بالا (عدد رینولدز بالا) و دما ثابت و تراکم ناپذیر است. برای چنین جریانی

^۲ Cut off size diameter

^۱ Fluent

$$\begin{aligned} \Phi_{ij,w} = c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[\overline{u_k u_m} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u_k u_j} n_k n_j \right. \\ \left. - \frac{3}{2} \overline{u_j u_k} n_i n_k \right] \frac{c_1 k^2}{\varepsilon d} \\ + c_2 \left[\Phi_{mk,2} n_k n_m \delta_{ij} \right. \\ \left. - \frac{3}{2} \Phi_{ik,2} n_j n_k \right. \\ \left. - \frac{3}{2} \Phi_{jk,2} n_i n_k \right] \frac{c_1 k^2}{\varepsilon d} \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه فوق $c_1 = 0.5$ و $c_2 = 0.3$ و n_k مولفه عمود بر دیوار، d فاصله از دیوار و $c_\mu = \frac{c_\mu^+}{\kappa}$ و $c_\mu = 0.09$ و K ثابت فون کارمن است $\{20\}(\kappa=0.4187)$

در سلولهای مجاور دیواره برای تعیین مقادیر توربولانسی از توابع دیواره استاندارد ۲ استفاده شده است. در استفاده از توابع دیواره استاندارد محدوده عدد بدون بعد در سلول مجاور دیواره باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد ($300 < y^+ < 30$). در تولید شبکه از این معیار برای تعیین سائز سلولهای مجاور دیواره استفاده شده است.

۲-۲- معادلات فاز گسسته

با توجه به شرایط کم بودن مقدار قطرات (کسر حجمی کمتر از ۱۰ درصد برای قطرات)، فرض می شود حرکت فاز قطرات بر روی جریان گاز موثر نیست. این شرایط به صورت کوپلینگ یک طرفه معرفی می شود. در نرم افزار فلوئنت، روش لاگرانژی جهت مسیر یابی قطرات و همچنین پاشش در سیکلون مورد استفاده قرار می گیرد. برای یک قطره پراکنده معادله شتاب قطره به صورت زیر می باشد:

$$\frac{d\vec{u}_i}{dt} = F_D(\vec{u}_i - \vec{u}_p) + \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \vec{g}_i + \vec{F}_i \quad (15)$$

با توجه به رابطه بالا F_i شتاب ناشی از نیروی لیفت سافمن، u_{pi} سرعت قطره و $(u_i - u_p)$ شتاب ناشی از نیروی درگ وارد بر جرم قطره، ρ_p چگالی قطره، g_i شتاب گرانش است. برای قطرات کروی عدد رینولدز جریان نسبی به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{\rho_d p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (16)$$

۲-۳- اعداد بی بعد

بازدهی جداسازی سیکلون وابسته به فیزیک و ابعاد حاکم بر جریان و خواص فیزیکی گاز و قطره است. هر کدام از این پارامترها به دو دسته تقسیم می شوند. دسته اول شامل پارامترهای وابسته به جریان گاز درون سیکلون و پارامترهای دیگر شامل ویسکوزیته دینامیکی، چگالی گاز، سرعت و قطر سیکلون بوده است. دسته دوم شامل اندازه قطره d_p و چگالی ρ_p است. بنابراین برای سیکلون استیرمند بازدهی η مرتبط با پارامترهای بی بعد چون St و Re می باشد که عدد St نسبت زمان عکس العمل فاز پیوسته به زمان عکس العمل فاز قطرات رانشان می دهد ($St = \frac{\tau}{\tau_p}$). این پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\eta = f(Re, st) \quad (17)$$

$$st = \frac{(\rho_p - \rho) D_p^2 u_0}{18 \mu d} \quad (18)$$

با میانگین گیری رینولدزی معادلات ناویر استوکس و بقای جرم به صورت زیر درمی آیند:

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

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

در مدل RSM، معادلات انتقال برای هر شش مولفه های تانسور تنش رینولدزی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial t} + u_k \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

عبارت دیفیوژن D_{ij} به صورت زیر می باشد:

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

P_{ij} عبارت تولید تنش بوده و به صورت زیر بیان می شود:

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

Φ_{ij} همبستگی عبارت کرنش-فشار^۱ بوده و به صورت زیر می باشد:

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

ε_{ij} عبارت اضمحلال بوده و به صورت زیر می باشد:

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

عبارت کرنش-فشار در معادله (۶) مطابق پیشنهادات جیسون و لاندرا و فیو و همکارانش ولاندر مدل شده است [۲۰]. در روش کلاسیک مدل Φ_{ij} به صورت زیر تجزیه می شود:

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2} + \Phi_{ij,w} \quad (8)$$

$\Phi_{ij,1}$ عبارت کرنش-فشاری کند است. همچنین این عبارت به برگشت پذیری ناهمسانگردی مشهور است. $\Phi_{ij,2}$ عبارت کرنش-فشار سریع نامیده می شود. $\Phi_{ij,w}$ عبارت انعکاسی دیواره است. عبارت کرنش-فشاری کند $\Phi_{ij,1}$ به صورت زیر مدل می شود:

$$\Phi_{ij,1} = -c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \quad (9)$$

در رابطه (۹) $c_1 = 1.8$ است.

عبارت کرنش-فشار سریع $\Phi_{ij,2}$ به صورت زیر مدل می شود:

$$\begin{aligned} \Phi_{ij,2} = -c_2 \left[\left(P_{ij} + F_{ij} + \frac{5}{6} G_{ij} - c_{ij} \right) \right. \\ \left. - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(P + \frac{5}{6} G - c \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه فوق $c_2 = 0.6$ می باشد. عبارتهای P_{ij} و F_{ij} و G_{ij} به صورت زیر مدل می شوند:

$$P_{ij} = \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (11)$$

$$F_{ij} = -2\rho \Omega_k (\overline{u_i u_m} \epsilon_{jkm} - \overline{u_j u_m} \epsilon_{ikm}) \quad (12)$$

$$G_{ij} = -\rho B (g_i \overline{u_j \theta} - g_j \overline{u_i \theta}) \quad (13)$$

عبارت انعکاس دیواره، $\Phi_{ij,w}$ نقش توزیع مجدد تنش نرمال نزدیک دیوار را دارد. این عبارت تمایل دارد که تنش نرمال عمود بر دیوار را مستهلک کند و تنش های موازی دیوار را زیاد کند. این عبارت به صورت رابطه (۱۴) مدل می شود:

² Standard Wall Functions

^۱ Pressure-strain

$$E^2 = \frac{\rho V_f^2 d_p}{\sigma} \left(\frac{1}{\min\left(\frac{h_0}{d_p}, 1\right) + \frac{\delta_{bl}}{d_p}} \right) \quad (25)$$

در رابطه ذکر شده h_0 ارتفاع فیلم مایع و ρ چگالی مایع، V_f سرعت نسبی قطره در محدوده دیوار، D سایز قطره و σ کشش سطحی مایع است. همچنین ضخامت δ_{bl} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\delta_{bl} = \frac{d_p}{\sqrt{Re}} \quad (26)$$

در رابطه فوق عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می شود:

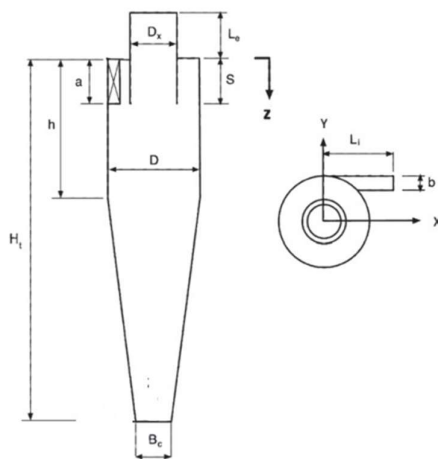
$$Re = \frac{\rho V_f d_p}{\mu} \quad (27)$$

هنگامی چسبندگی قطرات بر روی دیواره مطرح است که انرژی بی بعد برخوردی کمتر از ۱۶ و سرعت کل قطرات برابر سرعت دیواره باشد [۲۰].

اگر دمای دیوار بالاتر از دمای جوش مایع باشد. انرژی برخوردی آن کمتر از انرژی برخوردی بحرانی خواهد بود. پاشش زمانی رخ می دهد که انرژی برخورد بالاتر از آستانه انرژی بحرانی باشد که مقدار آن ۵۷/۷ است [۱۷]. یکی از اهداف پژوهش حاضر بررسی کردن امکان پدیده پاشش است.

۲-۵- هندسه و شرایط مرزی

در این پژوهش به منظور بررسی کردن پاشش و دیگر پارامترهای جریان از هندسه سیکلون استیرمند [۱۸] استفاده شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد آن به صورت جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳- مشخصات هندسی سیکلون

یکی از مسائل مهم در شبیه سازی جریان داخل سیکلون تولید شبکه است. شبکه های ایجاد شده به صورت چند بلوکی با ساختار شش وجهی در کل دامنه محاسباتی است که در شکل ۴ دیده می شود. به عنوان مثال نحوه ایجاد شبکه لوله خروجی نمای روبروی آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به هندسه و شبکه های ایجاد شده بر روی آن شبکه های ایجاد شده در دامنه محاسباتی با استفاده از سلولهای شش وجهی موازی ایجاد شده است که در شکل های ۴ و ۵ دیده می شود. تعداد سلولهای ایجاد شده در مرکز سیکلون به نسبت با

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (19)$$

بر اساس محاسبه انجام شده در مطالعه حاضر، عملکرد سیکلون به قطر خروجی بسیار وابسته است. بنابراین انتظار می رود که بازدهی آئروسیکلون به اعداد بی بعد بالا و قطر خروجی وابسته باشد بنابراین راندمان به صورت زیر بدست می آید:

$$\eta = f\left(Re, St, \frac{D_x}{D}\right) \quad (20)$$

سیکلون ها در صنعت به کمک اندازه برش ذرات ۱ مشخص می شوند. dp_{90} قطری است که در آن بازدهی و کارایی سیکلون ۹۰ درصد است. عدد استوکس متناظر با اندازه برش ۵۰ و ۹۰ به صورت یوده است.

$$st_{50} = f\left(Re, \frac{D_x}{D}\right) \quad (21)$$

$$st_{90} = f\left(Re, \frac{D_x}{D}\right) \quad (22)$$

$$Eu = f\left(Re, \frac{D_x}{D}\right) \quad (23)$$

افت فشار محاسبه شده با در نظر گرفتن سه سرعت برای سه قطر خروجی با برازش منحنی از داده های تجربی هوکسترا [۱۸] به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{1}{Eu} = a + \frac{b}{Re^{0.5}} + c \left(\frac{D_x}{D}\right)^{0.5} \quad (24)$$

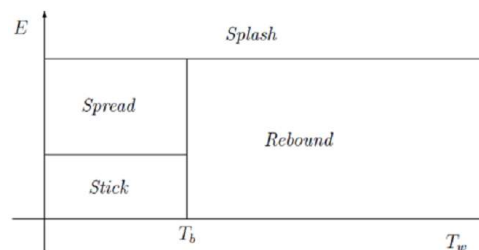
ضرایب ثابت در معادله فوق به صورت زیر می باشد:

$$a = -0.4 \quad b = 7.52 \quad c = 0.823$$

رابطه (۲۴) از داده های تجربی هوکسترا [۱۸] بدست آمده است.

۲-۴- پاشش

مدل سازی برخورد قطره با دیوار بر اساس کار آروک [۱۷] در نظر گرفته شده است. رژیم های واکنش قطرات دیوار بر اساس تشکیل موضعی آنها محاسبه می شود. چهار رژیم عبارتند از چسبندگی، انعکاس، انتشار و پاشش بر اساس انرژی برخوردی و دمای دیوار می باشد. در شکل ۲ حالت های مختلف برخورد قطره با دیواره نشان داده شده است.

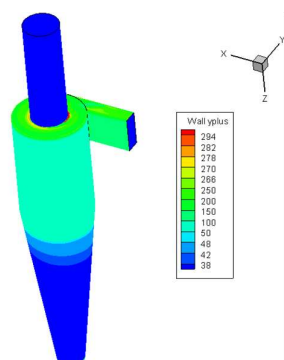


شکل ۲- چگونگی برخورد قطرات به دیوار [۲۳]

در دمای کمتر از دمای جوش، برخورد قطرات می تواند به صورت چسبندگی، پخش یا پاشش باشد. در حالی که بالاتر از دمای جوش، برخورد قطرات به صورت انعکاسی یا پاشش است. معیار هر کدام از حالت های موجود بر اساس انرژی برخوردی و دمای جوشش مایع است. انرژی برخوردی به صورت رابطه (۲۵) تعریف می شود:

1 Cut-off size diameter

2 Splashing



شکل ۶- محدوده y^+ برای سلولهای مجاور دیوار در نواحی مختلف

شرایط مرزی و اولیه مسأله در جدول ۲ آمده است. خصوصیات فیزیکی هوا و قطرات نیز در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲- شرایط مرزی و اولیه مسأله

مقادیر	نوع شرط
سرعت یکنواخت 10 m/s	ورودی
جریان خروجی	لوله خروجی
شرط دیواره با رعایت کردن اصل عدم لغزش	بقیه شرایط مرزی
۵ درصد	شدت آشفتنی

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی هوا و قطرات [۲۰]

ویسکوزیته دینامیکی [Pa.s]	چگالی $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	نوع سیال
0.000211	1.225	هوا
0.001003	999.9	آب

۲-۶- روش حل عددی

معادلات میانگین گیری شده زمانی جریان گاز با استفاده از نرم افزار فلوئنت حل شده است. کلیه گسسته سازی های سلول های محاسباتی به روش حجم محدود انجام می گیرد. برای کوپلینگ بین سرعت-فشار از الگوریتم سیمپل^۲ استفاده شده است. روش تجزیه عبارتهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. معادلات با روش تکرار حل می شود و مقادیر باقیمانده هر یک از معادلات برای اتمام روش تکرار 10^{-5} در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- تنظیمات عددی برای شبیه سازی حاضر

نحوه تجزیه	معادله
روش ضریب وزنی نیروهای بدنی ^۳	گسسته سازی فشار
روش کوئیک ^۴	گسسته سازی مومنتوم
بالادست مرتبه دوم ^۵	انرژی جنبشی آشفتنی
بالادست مرتبه دوم	نرخ اتلافات آشفتنی
بالادست مرتبه اول ^۶	تنش رینولدز

² SIMPLE

³ Body force weighted

⁴ QUICK

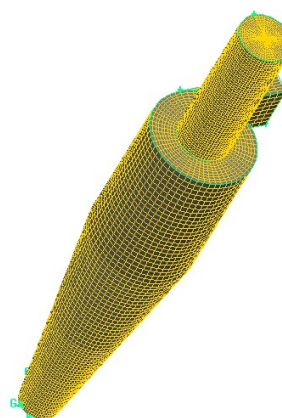
⁵ Second order upwind

⁶ First order upwind

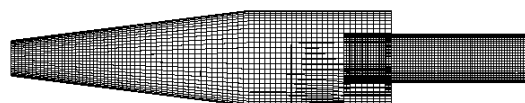
توجه به تغییرات شدید جریان در هسته مرکزی (که دلیل آن PVC است) به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شده است. در نرم افزار فلوئنت، قانون لگاریتمی-دیوار برای سرعت متوسط، در محدوده $30 < y^+ < 300$ معتبر می باشد. فاصله اولین مرکز سلول تا دیواره در داخل ناحیه لگاریتمی قرار می گیرد (شکل ۶). در این مسأله برای ایجاد شبکه سازمان یافته از نرم افزار گمبیت^۱ استفاده شده است.

جدول ۱- ابعاد سیکلون

ابعاد	نام قسمت
0.39	D (m) قطر سیکلون
$0.5D$	a(m) ارتفاع ورودی
$0.3D$	b(m) عرض ورودی
$0.37D$	Dc(m) قطر پایین مخروطی
متغیر	Dx(m) قطر لوله خروجی
$1/5D$	h (m) ارتفاع استوانه
$4D$	H_t ارتفاع کل سیکلون
D	Li(m) طول کانال ورودی
$3D$	Le(m) طول لوله خروجی بالایی
$0.5D$	S(m) طول لوله خروجی



شکل ۴- شبکه بندی هندسه



شکل ۵- نمای روبروی شبکه بندی

¹ Gambit

با استفاده از ابعاد سیکلون و نرخ جریان گاز، زمان آسایش محاسبه می شود [۱۹]. میانگین زمان آسایش برای انتخاب گام شبیه سازی ناپایا استفاده شده به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$t_{res} = \frac{V}{Q} \quad (28)$$

در رابطه فوق V حجم سیکلون و Q نرخ جریان گاز است. زمان آسایش هر یک از مدل های استفاده شده برای شبیه سازی بین ۰/۶ تا ۰/۷۳ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل ناپایا بودن جریان ایجاد شده در آئروسیکلون پدیده انحراف هسته ورتکس^۱ است [۲۱].

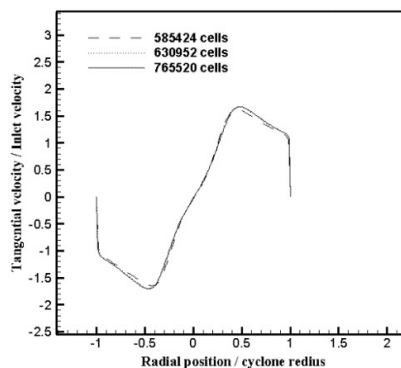
۳- استقلال جوابها از شبکه حل و اعتبار سنجی

م به منظور دست پیدا کردن به استقلال حل از شبکه، شبکه های مختلف با تعداد سلول های ۵۸۵۴۲۴ و ۶۳۰۹۶۲ و ۷۶۵۵۲۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۵ نتایج استقلال جوابها از شبکه حل برای پارامتری بعد اویلر ارائه شده است. به همین منظور سرعت مماسی برای هر سه شبکه در خط $z=0.2175$ از کف آئروسیکلون مورد بررسی قرار گرفته است که شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۵- جزئیات استقلال جوابها از شبکه حل

Eu	تعداد کل سلول
۵/۳۶	۴۵۶۸۹۲
۵/۵۴	۵۸۵۴۲۴
۵/۷۹	۶۳۰۹۵۲
۵/۸۵	۷۶۵۵۲۰

با ملاحظه کردن شکل های مورد نظر تعداد سلول ۵۸۵۴۲۴ استقلال از شبکه قابل قبولی را به دست می دهد.

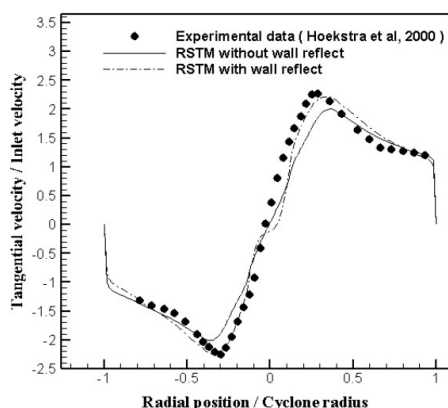


شکل ۷- استقلال جوابها از شبکه حل برای سرعت مماسی

برای بررسی اعتبار سنجی شبیه سازی، تمام نتایج بدست آمده با داده های آزمایشگاهی هوکسترا [۱۸] مورد مقایسه قرار گرفته است. تفسیر فیزیکی نتایج بدست آمده از تغییر قطر لوله خروجی به این صورت بیان می شود.

در این قسمت بررسی اثرات عبارت انعکاسی دیواره و عدم استفاده از آن در آئروسیکلون مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. مدل RSM

بدون عبارت اثرات انعکاسی دیواره نمی تواند ناهمسانگردی تنش رینولدزی در محدوده دیواره را پیش بینی کند، لذا با اثر دادن عبارت انعکاسی دیواره تنش نرمال در تانسور تنش رینولدزی کاهش یافته و باعث افزایش تنش در راستای موازی با دیواره می شود [۲۰]. از طرفی با فاصله گرفتن از دیوار سطح ناهمسانگردی تنش رینولدزی خیلی بالا است. اثرات عبارت دیواره بر روی تانسور تنش رینولدزی محدود به ناحیه نزدیک به دیوار نمی باشد [۲۲]. از این رو اثرات دیواره عامل مهمی بر توزیع سرعت مماسی است که در شکلهای ۸ و ۹ به آن اشاره شده است. بدین منظور تأثیرات این عامل همراه با تغییرات قطر خروجی لحاظ می شود.



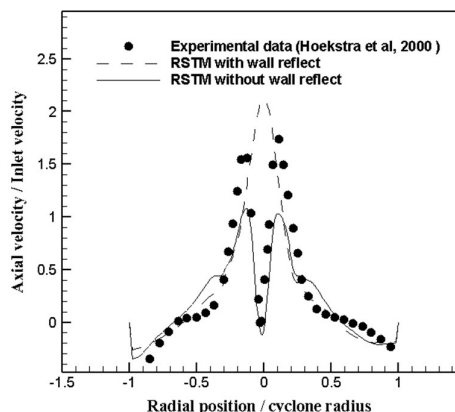
شکل ۸- اثرات عبارت انعکاسی دیواره در مدل $\frac{D_x}{D} = 0.4$ بر سرعت مماسی روی خط $z=0.2175$ از کف آئروسیکلون

البته توزیع سرعت مماسی برای هر سه سیکلون تقریباً الگوی یکسانی دارد و ماکزیمم سرعت مماسی در سیکلون $D_x = 0.3D$ اتفاق می افتد. پروفیل سرعت مماسی از دو ناحیه تشکیل می شود. در ناحیه داخلی که تقریباً چرخشی است شبیه دوران جسم جامد عمل می کند که به آن ورتکس اجباری^۲ گفته می شود و با افزایش شعاع، سرعت مماسی افزایش می یابد. در نواحی دور از مرکز، رفتار جریان شبیه به گردابه آزاد (یا ورتکس رنکین^۳) می باشد. همان گونه که در شکلهای مشاهده می شود، با کوچک شدن قطر لوله خروجی وسعت ورتکس اجباری کمتر می شود از سوی دیگر کاهش قطر لوله خروجی، باعث افزایش مقدار سرعت مماسی می شود که در نمودار های ۸، ۹ قابل مشاهده است. اختلاف پیش بینی ها در سرعت مماسی چندان زیاد نیست. البته همان گونه که در بخش بعدی ذکر خواهد شد، عدم استفاده از عبارت انعکاسی دیواره در توزیع سرعت محوری خطاهای فاحشی را به دنبال خواهد داشت.

² Forced Vortex

³ Vortex Rankin

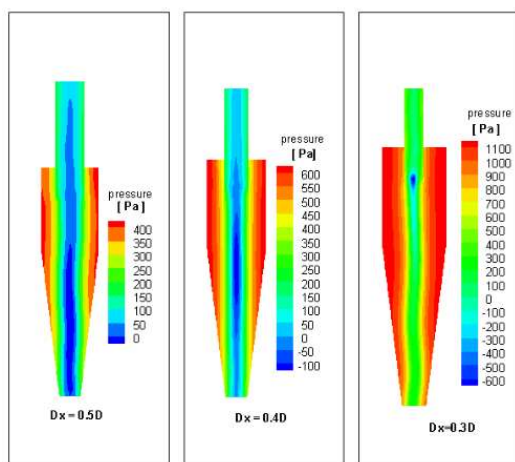
¹ Precession vortex core



شکل ۱۱- اثرات عبارت انعکاسی دیواره در مدل $\frac{D_x}{D} = 0.3$ بر سرعت محوری روی خط $z=0.2175$ از کف آبروسیکلون

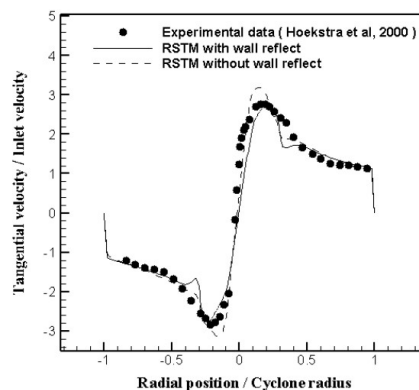
۴- توزیع فشار و راندمان جداسازی قطرات

افت فشار در سیکلون نتیجه اصطکاک با دیواره ها و اختلاط جریان در داخل سیکلون است. از طرفی در اغلب موارد کاهش افت فشار، کاهش راندمان جداسازی قطرات را به دنبال خواهد داشت. کانتورهای فشار در شکل ۱۲ برای مقادیر مختلف قطر خروجی نشان داده شده است. ملاحظه می شود که هرچه قطر خروجی کاهش یابد، افت فشار افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که تلفات انرژی بطور عمده در هسته آبروسیکلون اتفاق می افتد.



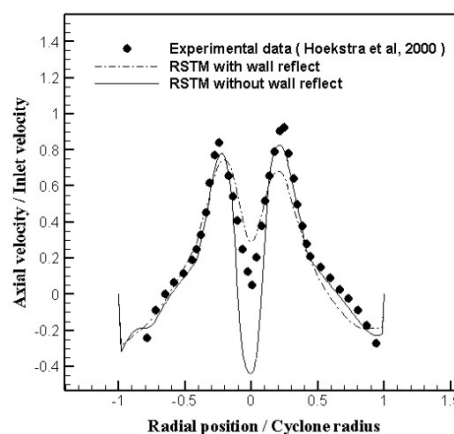
شکل ۱۲- کانتورهای فشار برای قطرهای خروجی مختلف اثرات

همچنین با کاهش دادن قطر خروجی افت فشار افزایش می یابد که به صورت شکل ۱۳ ارائه می شود.

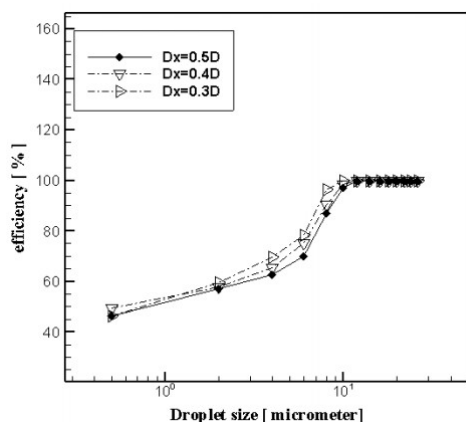


شکل ۹- اثرات عبارت انعکاسی دیواره در مدل $\frac{D_x}{D} = 0.3$ بر سرعت مماسی روی خط $z=0.2175$ از کف آبروسیکلون

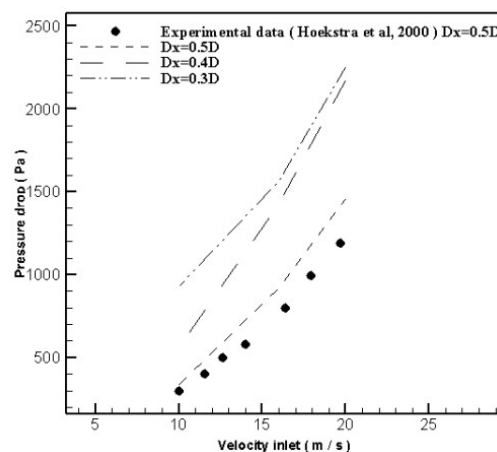
انتخاب مدل RSM بدون عبارت اثرات انعکاسی دیواره با بزرگتر شدن قطر خروجی آثار مثبتی به همراه ندارد. برای نسبتهای قطری 0.4 و 0.5 در نظر گرفتن عبارت اثرات انعکاسی دیواره، با نتایج بهتری را ارائه می دهد. با این حال برای نسبت قطری $\frac{D_x}{D} = 0.3$ مدل RSM با اثرات انعکاسی دیواره پیش بینی مناسبی نخواهد داشت (شکل ۱۱). مولفه سرعت محوری در نزدیکی خط مرکزی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی ندارد. علت این تناقض افزایش فشار در ناحیه گردابه اجباری نسبت به ناحیه گردابه آزاد است. زیرا با افزایش فشار سرعت محوری در ناحیه ورتکس اجباری افزایش می یابد. سرعت در ناحیه ورتکس آزاد به کمترین مقدار ممکن می رسد. همچنین با در نظر گرفتن اثرات انعکاسی دیواره اندازه سرعت محوری ناحیه هسته داخلی کاهش می یابد. البته در هر دو سیکلون جریان خط مرکزی معکوس می شود که به صورت شکل های ۱۰ و ۱۱ قابل ارائه می باشد.



شکل ۱۰- اثرات عبارت انعکاسی دیواره در مدل $\frac{D_x}{D} = 0.4$ بر سرعت محوری روی خط $z=0.2175$ از کف آبروسیکلون

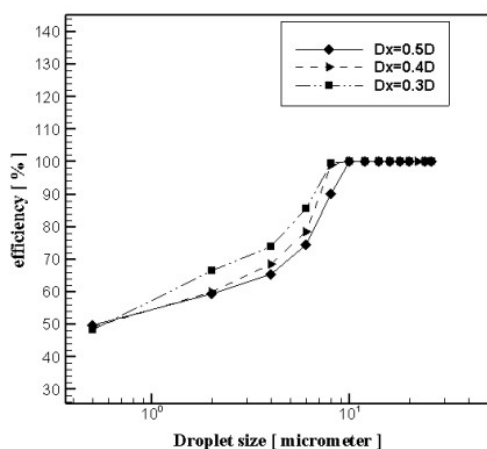


شکل ۱۵- تغییر راندمان قطره گیری با قطر خروجی در سرعت ۱۶ متر بر ثانیه



شکل ۱۳- اثرات تغییرات قطر خروجی بر افت فشار

در این پژوهش برخورد قطرات با دیواره سیکلون، با شرط مرزی فیلم- دیواره لحاظ می شود. نتایج عددی به دست آمده نشان می دهد که در سیکلون استیرمند برای محدوده سرعت جریان گاز و سایز قطرات مورد مطالعه در این پژوهش پدیده پاشش قطره رخ نمی دهد. یکی از دلایل رخ ندادن این پدیده می تواند این باشد که جریان گاز که به صورت چرخشی به سمت پایین حرکت می کند با تماس به دیواره سیکلون قطراتی که به صورت پراکنده به دیوار برخورد می کنند اجازه تشکیل فیلم را نمی دهد.

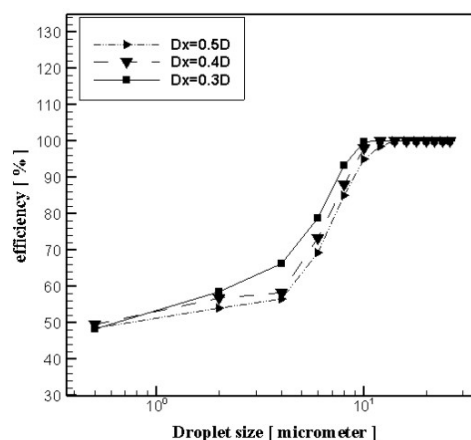


شکل ۱۶- تغییر راندمان قطره گیری با قطر خروجی در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

راندمان جداسازی قطرات تابع سرعت ورودی، قطر لوله خروجی و پارامترهای فیزیکی جریان است. راندمان جداسازی قطرات به توزیع اندازه قطرات ورودی وابسته است. توانایی جداسازی یک سیکلون بوسیله درصد منحنی بازدهی مشخص می شود. از کل قطرات ورودی که از طریق کانال ورودی تزریق می شوند، تعدادی با برخورد به دیواره ها و کف سیکلون جدا می شوند و مابقی از طریق لوله خروجی رهایی می یابند. بر این اساس راندمان قطره گیری به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{\text{دبی جرمی قطرات به دام افتاده}}{\text{دبی جرمی قطرات ورودی}} \quad (29)$$

شکل های ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ راندمان قطره گیری پیش بینی شده برای سیکلون استیرمند به ازای سه مقدار سرعت ورودی ۱۰ m/s و ۱۶ m/s و ۲۰ m/s نشان می دهد.



شکل ۱۴- اثرات تغییرات قطر خروجی بر راندمان در سرعت 10 m/s

۵- نتیجه گیری

به کمک نرم افزار فلوئنت و با استفاده از مدل آشفته RSM شبیه سازی جریان گاز و قطرات در سیکلون استیرمند با قطرهای خروجی مختلف انجام شده است. این مدل آشفته نتایج قابل قبولی را در مقایسه با داده های آزمایشگاهی ارائه می دهد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کاهش قطر لوله خروجی سرعتهای مماسی و نیروی گریز را در مرکز ساختار جریان افزایش می دهد و همین عامل باعث بهبود بازدهی سیکلون می شود. به علاوه با کاهش قطر لوله خروجی بازدهی و افت

افزایش سرعت ورودی موجب توانایی افزایش جداسازی می شود و همین عامل باعث افزایش نیروی گریز از مرکز بر روی قطرات شده است.

- [3] Brar L. S., Sharma R. P., Elsayed K. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. Powder Technology. Vol. 286, pp. 668–677, 2015.
- [4] Hwang K.-J., Hwang Y.-W., Yoshida H. Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using computational fluid dynamics. Chemical Engineering Sciences, Vol. 85, pp. 62–68, 2012.
- [5] Gao X., Chen J., Feng J., Peng X., Numerical investigation of the effects of the central channel on the flow field in an oil-gas cyclone separator, Computers and Fluids, Vol. 92, pp.45–55, 2013.
- [6] Shi L., Bayless D. J., Comparison of boundary conditions for predicting the collection efficiency of cyclones, Powder Technology, Vol. 173, pp. 29–37, 2007.
- [7] Boysan F., Ayers W. H. & Swithenbank J. A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. Transactions of the Institution of Chemical Engineering, Vol. 60, pp. 222–230, 1982.
- [8] Horvath A., Jordan C., & Harasek M. A., Horvath C., Jordan M., Harasek, Influence of vortex-finder diameter on axial gas flow in simple cyclone, Chemical Product and Process Modeling, Vol. 3 (No.1), pp.1–26, 2008.
- [9] Gimbin J., CFD simulation of aerocyclone hydrodynamics and performance at extreme temperature. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 2, pp. 22–29, 2008.
- [10] Hoffmann A. C., De Groot M., Peng W., Dries H. W. A., Kater J., Advantages and risks in increasing cyclone separator length. AIChE Journal, Vol. 47, pp. 2452–2460, 2001.
- [11] Xiang R. B., Lee K. W., Numerical study of flow field in cyclones of different height. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 44, pp.877–883, 2005.
- [12] Zhu Y., Lee K. W. Experimental study on small cyclones operating at high flow rates. Journal of Aerosol Sciences, Vol. 30, pp. 1303–1315, 1999.
- [13] Avci A., Karagoz I., Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators, Journal of Aerosol Sciences, Vol. 34, pp. 937–955, 2003.
- [14] Keça, A., The efficiency improvement of a large-diameter cyclone - The CFD calculations, Separation and Purification Technology, Vol. 118, pp. 105–111, 2013.
- [15] Surmen A., Avci A., Karamangil M. I., Prediction of the maximum-efficiency cyclone length for a cyclone with a tangential entry, Powder Technology, Vol. 207, pp.1–8, 2011.
- [16] Lee J. W., Yang H. J. & Lee D. Y. Effect of the cylinder shape of a long-coned cyclone on the stable flow-field establishment. Powder Technology, Vol. 165, pp. 30–38, 2006.
- [17] O'Rourke P. J. & Amsden A. A., A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model, SAE Technical Paper, No.:2000-01-0271, 2000.
- [18] Hoekstra A.J., Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators, TU Delft, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2000.
- [19] Gao X., Chen J., Feng J., Peng X., Hoffmann A.J., Stein L.E. Gas cyclones and swirl channels: principles, design and operation. Beijing: Chemical Industry Press; 2004. Computers and Fluids, Vol. 92, pp. 45–55, 2013.
- [20] Fluent. 6.2.3, User's Guide Document, Fluent Inc., 2006.
- [21] Cortés, C., Gil, A., Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 33, pp. 409–452, 2007.
- [22] Hadzic' I., Second-moment closure modeling of transitional and unsteady Turbulent flows. Ph.D. thesis, Faculty of Technical physics, Delft University of Technology, 1999.

[۲۳] نعمت بخش ع، حل عددی جریان های با سطح مشترک با استفاده از روش لول ست و مقایسه آن با روش کسر حجمی سیال، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۷.

فشار بیشتری ملاحظه می شود. در این پژوهش اثرات انعکاسی دیواره و عدم استفاده از این عبارت مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آنکه اثرات دیواره می تواند ناهمسانگردی تنش رینولدزی را در محدوده دیواره آنروسیکلون پیش بینی کند و با توجه به اینکه سطح ناهمسانگردی در جریان داخل سیکلون زیاد است، با اعمال این عبارت نتایج عددی در اغلب موارد به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می شود. البته برای قطر خروجی کوچک ($D_x=0.3D$)، سرعت محوری در مرکز دارای انحراف نسبت به نتایج آزمایشگاهی است. نتایج نشان می دهد که کاهش قطر خروجی راندمان سیکلون را افزایش می دهد ولی این موضوع، با افزایش افت فشار در سیکلون همراه است.

۶- نمادها

a	ارتفاع سیکلون (m)
b	طول (m)
C_D	ضریب پسا (-)
d_p	اندازه قطره (μm)
D_{ij}	عبارت دیفیوژن
D_x	قطر لوله خروجی (m)
D	قطر سیکلون (m)
E_j	انرژی برخوردی (J)
Eu	عدد اویلر (-)
F_D	نیروی پسا بر واحد جرم (m/s^2)
g	شتاب جاذبه (m/s)
h	ارتفاع استوانه (m)
H_t	ارتفاع کل سیکلون (m)
P_{ij}	عبارت تولید (m^2/s^3)
Q	دبی حجمی (m^3/s)
Re	عدد رینولدز (-)
L_e	طول لوله خروجی (m)
St	عدد استوکس (-)
t_{res}	زمان آسایش (s)
u_{in}	سرعت ورودی (m/s)
v_r	سرعت گاز نسبت به قطره (m/s)
$\square$	حجم سیکلون (m^3)
ρ_D	چگالی قطره (kg/m^3)
ρ	چگالی گاز (kg/m^3)
v	لزجت سینماتیکی (m^2/s)
η	راندمان قطره گیری (-)
σ	کشش سطحی (N/m)
δ_{bl}	ضخامت لایه مرزی (m)

۷- مراجع

- [1] Shukla S. K., Shukla P. & Ghosh P., The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators, Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, pp. 5774–5789, 2013.
- [2] Karagoz I. & Avci A. Modelling of the pressure drop in tangential inlet cyclone separators. Aerosol Science and Technology, Vol. 39, pp. 857–865, 2005.