

بهبود راندمان یک سیکلون گازی در شرایط کاری دما-بالا با استفاده از هندسه

مناسب گرداب یاب

اکبر جعفرنژاد^۱

حسام الدین سالاریان^{*۲}

h_salarian@iaunour.ac.ir

سعید خردمند^۳

جهانفر خالقی نیا^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۹/۹/۱۸

چکیده

زمینه و هدف: سیکلون ها به طور گسترده در کنترل آلودگی هوا وظیفه جداسازی مخلوط گاز ذره را به عهده دارند و در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند. از مزایای این دستگاه در صنایع مختلف سادگی نسبی ساخت آن، هزینه عملیاتی پایین و سازگاری با شرایط دشوار صنعتی می باشد. امروزه جداسازهای سیکلونی به یکی از مهمترین دستگاه های حذف ذرات در زمینه های علمی و مهندسی تبدیل شده است. با توجه به کاربرد وسیع سیکلون ها در فرایندهای صنعتی به ویژه نیروگاه های حرارتی، بررسی عملکرد سیکلون ها در درجه حرارت های بالا از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. در این مطالعه شبیه سازی جریان دوفازی درون سیکلون با استفاده از دیدگاه اویلری-لاگرانژی به صورت سه بعدی انجام خواهد گرفت تا در محدوده وسیع دمایی عملکرد سیکلون مورد بررسی دقیق قرار بگیرد و در نهایت مشکل افت عملکرد آن با استفاده از طراحی مناسب هندسه گرداب یاب به طور قابل ملاحظه ای حل خواهد شد.

روش بررسی: در این مطالعه، تأثیر دمای ورودی بر میدان جریان و عملکرد جداسازی یک سیکلون به طور جامع با استفاده از شبیه سازی CFD مورد بررسی قرار گرفته است. رویکرد اویلر-لاگرانژی برای شبیه سازی جریان هوا و دینامیک ذرات در سیکلون استفاده شده است. علاوه بر این، در این مطالعه چهار هندسه گرداب یاب پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته و به منظور ارزیابی چگونگی تأثیر گرداب یاب بر عملکرد سیکلون تحت یک طیف وسیعی از دما ($293\text{ K} - 700\text{ K}$) با هندسه پایه مقایسه گردیده است. اعتبار مدل عددی با مقایسه افت فشار پیش بینی شده با داده های تجربی مرجع و نتایج عددی مرجع که در آن تطابق خوبی وجود داشته، تأیید گردیده است.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۲- دانشیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران.

۴- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران.

یافته ها: نتایج نشان داده است که افزایش دمای ورودی به میزان قابل توجهی سرعت مماسی را کاهش داده و منجر به کاهش شدید راندمان جداسازی سیکلون شده است. تمامی گرداب یاب های ارائه شده بر الگوی جریان درون سیکلون در همه دماهای ورودی تأثیر گذاشته اند. نتایج شبیه سازی نشان داده است که بالاترین سرعت مماسی مشاهده شده در سیکلون با ۱ CVF بوده که همچنین بر راندمان جداسازی مربوطه تأثیر مثبتی گذاشته است. همچنین، ثابت شده است که سیکلون پیشنهادی با ۱ CVF قادر به جمع آوری ذرات ریزتر (۲ میکرومتر) در دمای ورودی بالا ($T = 700 \text{ K}$) بوده است.

بحث و نتیجه گیری : در مطالعه حاضر ضمن بررسی عملکرد سیکلون با استفاده از دیدگاه اویلری-لاگرانژی به صورت سه بعدی در یک محدوده دمایی وسیع، راهکاری مناسب جهت بهبود راندمان و حل مشکل افت راندمان در دماهای بالا ارائه شده است. با تغییر مناسب ابعاد و هندسه گرداب یاب، می توان جریان در فضای پیش جدایش را به خوبی کنترل کرد تا راندمان جداسازی ذرات را بهبود بخشید.

واژه های کلیدی: سیکلون گازی، گرداب یاب، راندمان جداسازی، دما-بالا، دینامیک سیالات محاسباتی.

Improving efficiency of a gas cyclone in high-temperature operating conditions by using appropriate geometry of vortex finder

Akbar Jafarnezhad¹

Hesamoddin Salarian² *

h_salarian@iaunour.ac.ir

Saeid Kheradmand³

Jahanfar Khaleghinia⁴

Admission Date: August 10, 2021

Date Received: December 8, 2020

Abstract

Background and Objective: Cyclones are widely used in air pollution control to separate particulate gas mixtures and are used in industry. The advantages of this device in different industries are its relative simplicity of construction, low operating cost and reliable under extreme working conditions. Today, cyclone separators have become one of the most important particle removal devices in the fields of science and engineering. Due to the wide application of cyclones in industrial processes, especially thermal power plants, the study of the performance of cyclones at high temperatures is of particular importance. In the present study, two-phase flow simulation within a cyclone will be performed in three different dimensions using the Eulerian-Lagrangian approach in order to study the cyclone performance in a wide range of temperatures, and finally the problem of its lower performance will be substantially resolved by using appropriate geometry of vortex finder.

Material and Methodology: In this study, the effect of inlet temperature on the flow field and the separation performance of a cyclone has been comprehensively investigated using CFD simulation. The Euler-Lagrangian approach has been used to simulate airflow and particle dynamics in cyclones. In addition, four proposed vortex finder geometries were considered and compared with the basic geometry in order to evaluate how the vortex finder affects the cyclone performance under a wide temperature range (293 K-700 K). The validity of the numerical model is confirmed by comparing the predicted pressure drop with the experimental data and numerical results in which there is a good agreement was achieved.

Findings: The results demonstrated that increasing of inlet temperature significantly reduced the tangential velocity and led to a sharp decrease in the cyclone separation efficiency. All of the proposed vortex finders affected the flow pattern within the cyclone at all inlet temperatures. The simulation

1-Department of Mechanical Engineering, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran.

2-Department of Mechanical Engineering, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran. * (*Corresponding Author*)

3- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin-shahr, Isfahan, Iran.

4-Department of Mechanical Engineering, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran.

results showed that the highest tangential velocity observed in the cyclone was with CVF 1, which also had a positive effect on the relevant separation efficiency. Also, it is proved that the proposed cyclone with CVF 1 was able to collect finer particles (2 μm) at high inlet temperature ($T = 700 \text{ K}$).

Discussion and Conclusion: In the present study, while examining the performance of cyclone using the Eulerian-Lagrangian approach in three dimensions over a wide temperature range, a suitable solution to improve efficiency and solve the problem of efficiency drop at high temperatures was presented. By properly changing the dimensions and geometry of the vortex finder, the flow in the pre-separation zone can be well controlled to improve particle separation efficiency.

Keywords: Gas cyclone, Vortex finder, Separation efficiency, High-temperature, Computational Fluid Dynamics (CFD).

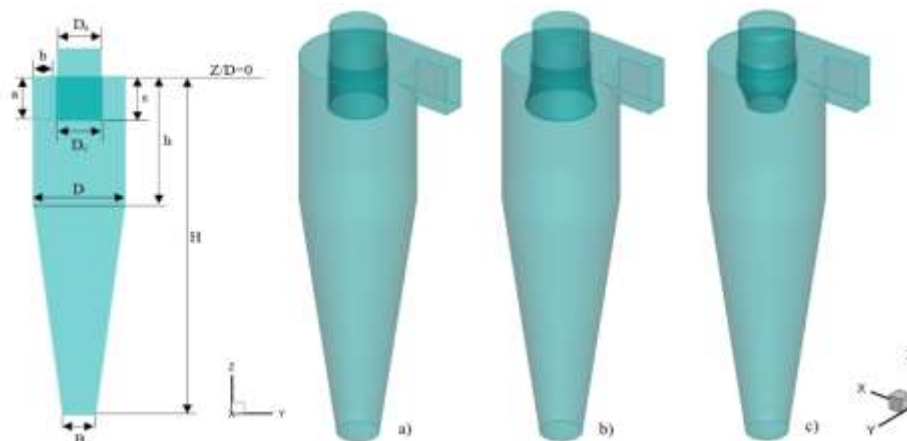
مقدمه

امروزه سیکلون ها به عنوان یکی از ابزارهای مهم در فرایند جداسازی، در صنایع مختلف از جمله معدن، متالورژی، نفت، گاز، پتروشیمی و آب و فاضلاب، به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند. زیانگ و همکارانش (۱) در سال های ۱۹۳۸ تا ۱۹۵۰، تلاش های فراوانی در زمینه ارائه فرمول هایی جهت طراحی سیکلون بهینه انجام دادند. ژو و همکارانش تأثیرات تغییر قطر بدنه سیکلون، قطر مجرای خروج گاز و ارتفاع سیکلون بر بازده جداسازی را تحلیل نمودند که نتیجه آن حاکی از بالا رفتن راندمان با افزایش ارتفاع سیکلون است (۲). جیاوو و همکاران با افزودن پره ای چرخان به داخل یک سیکلون دینامیکی به بررسی نحوه افزایش عملکرد دستگاه پرداخته و نشان دادند که با افزایش سرعت چرخش پره ها، بازده افزایش می یابد (۳). برنادو و همکاران (۴) اثر زاویه مقطع ورودی بدنه سیکلون را بر روی راندمان جدایش سیکلون با روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. آنها دریافتند که راندمان سیکلون هنگامی که اثر زاویه مقطع ورودی ۴۵ درجه در مقایسه با زاویه مقطع ورودی طبیعی باشد بهبود می یابد. وان و همکاران (۵) مطالعه ای را با موضوع شبیه سازی تمرکز ذرات جامد با اندازه های مختلف را در جداساز سیکلونی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سیالیت گاز به طور قابل توجهی با شدت ذرات جامد تغییر می کند. فتاحیان و همکاران (۶) به بررسی عددی تأثیر محل های مختلف لمینارایزر بر روی راندمان جداسازی، افت فشار، سرعت مماسی و مشخصه اندازه برش در دو نوع سیکلون استوانه ای و مربعی پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده همزمان از لمینارایزر در قسمت ورودی و گرداب یاب نسبت به محل های دیگر دارای بیشترین تأثیر در راندمان جداسازی ذرات دارد. همچنین استفاده همزمان از لمینارایزر در قسمت ورودی و گرداب یاب در دو نوع سیکلون استوانه ای و مربعی، به ترتیب باعث کاهش مشخصه اندازه برش حدود ۰.۸٪ و ۲۷٪ شده است. شین و همکارانش (۷) به بررسی اثرات ابعاد مجرای خروجی بر عملکرد سیکلون به صورت عددی و تجربی

پرداختند و همچنین اثرات فشار به همراه دما را بر عملکرد سیکلون تحلیل نمودند که در تحقیق آنها، افزایش افت فشار باعث بهتر شدن عملکرد سیکلون می شود. چرخش شدید جریان درون سیکلون سبب می شود تا بسیاری از مدل ها بر پایه همگن بودن جریان ورودی برای شبیه سازی پاسخگو نباشند. سیادتی و همکاران (۸) مطالعه ای را بر روی تأثیر جریان و دمای ذرات بر روی عملکرد سیکلون انجام دادند. سه پارامتر مهم از جمله افت فشار، راندمان جدایش ذرات و طول گردابه طبیعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می دهد که جریان چرخشی برای موارد با دمای بالاتر تضعیف می شود و بنابراین افت فشار جریان و بازده جداسازی ذرات به صورت قابل توجهی کاهش می یابد. همچنین افزایش دما باعث کاهش ۳۸٪ طول گردابه طبیعی می شود. واسیلوسکی (۹) اثر درجه حرارت را بر کارایی جداسازی ذرات جامد، بر روی یک سیکلون که بخشی از یک فرآیند پیش گرمایش است مورد مطالعه قرار داد. راندمان کل جداسازی سیکلون با افزایش درجه حرارت کاهش می یابد همچنین، راندمان جداسازی ذرات با افزایش جرم فاز جامد افزایش می یابد.

مدل هندسی و شبکه محاسباتی

در شکل ۱، نمای شماتیک جداکننده سیکلون تک ورودی با قطر بدنه ۳۰۰ میلی متر که در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده و بر اساس داده های تجربی موجود ژائو و همکاران است (۱۰) نشان داده شده است. علاوه بر این، نمای شماتیک سیکلون با گرداب یاب واگرا (DVF) و سیکلون با گرداب یاب همگرا (CVF) در شکل ۱ نشان داده شده است. در جدول ۱ ابعاد هندسی تمامی سیکلون ها نشان داده شده است. مشاهده می شود که فقط قسمت پایین گرداب یاب تغییر کرده و سایر قسمت ها ثابت نگه داشته شده اند. در مطالعه حاضر، شبکه شش وجهی بکار رفته است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در نواحی نزدیک به مرکز سیکلون، شبکه ها از نواحی دیگر متراکم تر هستند.



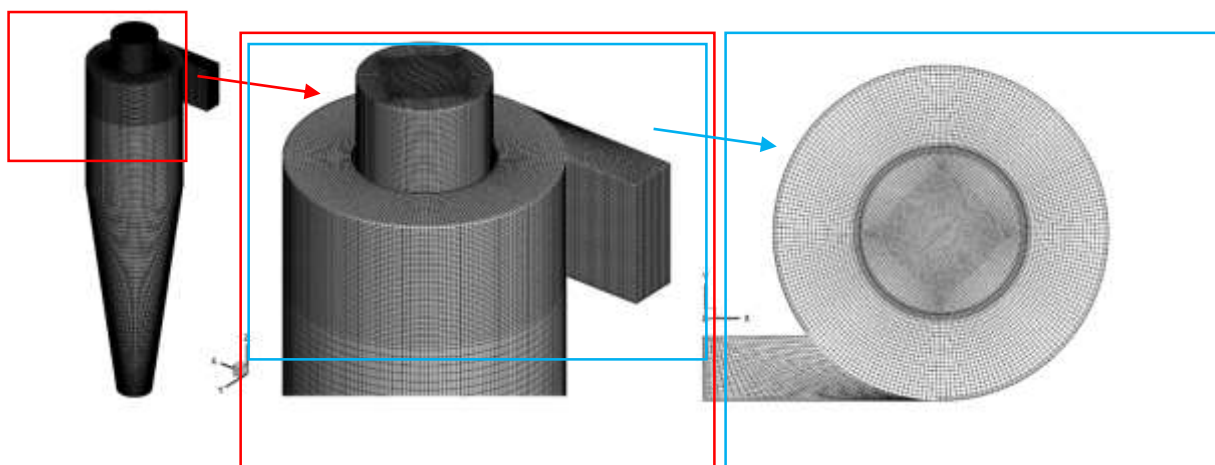
شکل ۱- شماتیک هندسه الف) سیکلون پایه ب) سیکلون با گرداب یاب واگرا ج) سیکلون با گرداب یاب همگرا

Figure 1. Schematic view of a) Base cyclone b) Cyclone with DVF c) Cyclone with CVF

جدول ۱- ابعاد سیکلون مورد بررسی

Table 1. Geometrical dimensions of cyclone (D=300 mm)

a/D	b/D	D _v /D	D _c /D	s/D	h/D	H/D	B/D	ابعاد
۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱/۵	۴	۰/۳۷۵	سیکلون پایه
۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۵۹	۰/۵	۱/۵	۴	۰/۳۷۵	سیکلون با DVF 1
۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۵۵	۰/۵	۱/۵	۴	۰/۳۷۵	سیکلون با DVF 2
۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۳۲	۰/۵	۱/۵	۴	۰/۳۷۵	سیکلون با CVF 1
۰/۵	۰/۲	۰/۵	۰/۳۸	۰/۵	۱/۵	۴	۰/۳۷۵	سیکلون با CVF 2



شکل ۲- شبکه محاسباتی

Figure 2. Computational grids

معادلات حاکم

می‌باشد. به منظور پیش بینی دقیق چرخش قوی و اثرات ناهمسانگردی میدان جریان در داخل سیکلون، نه مدل های استاندارد $k-\epsilon$ ، $k-\epsilon$ RNG و نه مدل توربولانسی Realizable $k-\epsilon$ برای پیش بینی این اثرات قابل اعتماد نیستند (۱۲، ۱۳). علاوه بر این، مطالعات قبلی توانایی مدل توربولانسی تنش رینولدز (RSM) را در شبیه سازی میدان جریان سیکلون ها گزارش کرده اند (۱۶-۱۴). بنابراین، در مطالعه حاضر مدل توربولانسی تنش رینولدز (RSM) (۱۷)، برای حل درست جریان یک سیکلون مورد استفاده قرار گرفت. مدل توربولانسی RSM معادلات دیفرانسیل را برای ارزیابی اجزای تنش توربولانس فراهم می کند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} R_{ij} + \bar{u}_k \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\nu_t}{\sigma^k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} \right) - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right] - C_1 \frac{\epsilon}{K} \left[R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} K \right] \\ &- C_2 \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon \end{aligned}$$

با توجه به اینکه P_f تولید کننده نوسانات انرژی است، ν_t ویسکوزیته توربولانس (ادی) است. $\sigma^k = 1$ ، $C_1 = 1.8$ ، $C_2 = 0.6$ ثابت های تجربی می باشند. معادله انتقال نرخ اتلاف توربولانس، ϵ ، به شکل زیر تعریف شده است (۱۹):

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma^\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - C^{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C^{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} \quad (5)$$

مدل فاز گسسته (DPM) نامیده می شود، استفاده شده است. در این مدل، ذرات منفرد از طریق سیال پیوسته ردیابی می شوند (۲۱). ضریب درگ برای ذرات کروی با استفاده از روابط توسعه یافته توسط مرسی و الکساندر (۲۲) به عنوان تابعی از عدد رینولدز نسبی (Re_p) محاسبه شده است. همچنین، مدل تصادفی گسسته (DRW) (۲۳) برای مدل سازی پراکندگی توربولانس ذرات بکار رفته است. معادله حرکت ذرات در مرجع (۲۴) آورده شده است:

به منظور شبیه سازی جریان درون جداکننده سیکلون، از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت سه بعدی استفاده شده است. معادلات ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز ناپایا (URANS) برای جریان ناپایدار نیوتنی را می توان به شرح زیر نوشت (۱۱):

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad (2)$$

که \bar{u}_i و x_i به ترتیب میانگین سرعت و مکان هستند. ρ و ν به ترتیب چگالی گاز و ویسکوزیته سینماتیک گاز را نشان می دهند. P ، میانگین فشار و $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ تانسور تنش رینولدز می-باشد. در اینجا، $u'_i = u_i - \bar{u}_i$ مؤلفه سرعت نوسانی i ام (۳)

که در آن ترم های تولید توربولانس P_{ij} به صورت زیر بیان میگردند (۱۸):

$$P_{ij} = - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right], \quad P_f = \frac{1}{2} P_{ij} \quad (4)$$

در معادله (5)، $K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ ، نوسانات انرژی جنبشی می‌باشد، و ϵ نرخ اتلاف توربولانس است. مقادیر ثابت ها $\sigma^\epsilon = 1.3$ ، $C^{\epsilon 1} = 1.44$ و $C^{\epsilon 2} = 1.92$ می باشند. در این مطالعه، از روش کوپل یک-طرفه برای حل جریان دو فاز استفاده شده و از رویکرد اوپلری-لاگرانژی برای شبیه سازی فاز گسسته دوم (ذرات) استفاده شده است. علاوه بر این، پیش بینی ردیابی ذرات در سیکلون گازی و محاسبه راندمان جمع آوری با استفاده از رویکرد لاگرانژی بدون در نظر گرفتن برخورد ذرات (۲۰) که

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_{pi}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (6)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (7)$$

شده است. شرط خروجی جریان برای بخش خروجی گاز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، شرط دیوار بدون لغزش برای دیوارهای سیکلون تعیین شده است و شرط DPM محصور برای قسمت خروجی ذرات استفاده شده است.

معادلات متوسط گیری حجمی و URANS با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. از مدل توربولانسی تنش رینولدز (RSTM) و تابع دیواره استاندارد با توجه به جریان چرخشی قوی در سیکلون به منظور بررسی تأثیر توربولانس استفاده شده است (۲۶). جزئیات دقیق شبیه سازی CFD در جدول ۳ ارائه شده است. شبیه سازی حاضر با یک حل کننده پایا برای ۱۲۰۰۰ تکرار (فقط گاز) آغاز شده و سپس به یک حل کننده ناپایا (ردیابی ذرات) با گام زمانی ثابت 1×10^{-4} s تغییر یافته است. مدت زمان ماندگاری بستگی به حجم سیکلون و میزان جریان حجمی گاز دارد (۲۷). گام زمانی استفاده شده در این مطالعه به اندازه کافی کمتر از کمترین زمان ماندگاری سیکلون می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$t_{res} = \frac{V}{Q} \quad (9)$$

که در آن ترم $\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_{pi})$ نیروی درگ در واحد جرم ذره است (۱۷). ρ_p و d_p به ترتیب چگالی و قطر ذرات هستند. C_D ضریب درگ را نشان می دهد، u_i و u_{pi} به ترتیب سرعت گاز و سرعت ذرات در جهت i هستند. μ و ρ به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی و چگالی گاز را نشان می دهند. g_i نشان دهنده شتاب گرانشی در جهت i و Re_p عدد رینولدز نسبی است.

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (8)$$

روش حل عددی

در مطالعه حاضر، هوا به عنوان فاز گاز با خواص حرارتی گوناگون در دماهای مختلف در نظر گرفته شده است. دماهای فاز گاز که برای محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است، در جدول ۲ ارائه شده است. چگالی ذرات ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) و اندازه ذرات از ۱ تا ۶ میکرومتر متغیر می باشد. شرط مرزی در قسمت ورودی گاز به عنوان سرعت ورودی تعیین شده است و فرض بر این است که سرعت های ورودی ذرات و گاز برابر بوده است. شدت توربولانس ۵٪ (۱۴،۲۵) انتخاب شده است و قطر هیدرولیکی در هنگام شبیه سازی ۰/۰۸۵۷ متر در نظر گرفته

جدول ۲- خواص ترمو-فیزیکی هوا در دماهای مختلف (۲۸)

Table 2. Thermo-physical properties of air at different temperatures (28)

$\mu \times 10^5$ (Pa.s)	k (W/m.K)	Cp (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)	T (K)	
-	۲۳۷	۹۰۰	۲۷۰۰	-	ذره جامد
۱/۷۸۹۴	۰/۰۲۴۳	۱۰۰۶/۵	۱/۱۸۸	۲۹۳	هوا
۲/۰۸۲	۰/۰۳	۱۰۰۹	۰/۹۹۵	۳۵۰	
۲/۷۰۱	۰/۰۴۰۷	۱۰۳۰	۰/۶۹۶۴	۵۰۰	
۳/۳۸۸	۰/۰۵۲۴	۱۰۷۵	۰/۴۹۷۵	۷۰۰	

جدول ۳- تنظیمات عددی در شبیه سازی CFD مطالعه حاضر

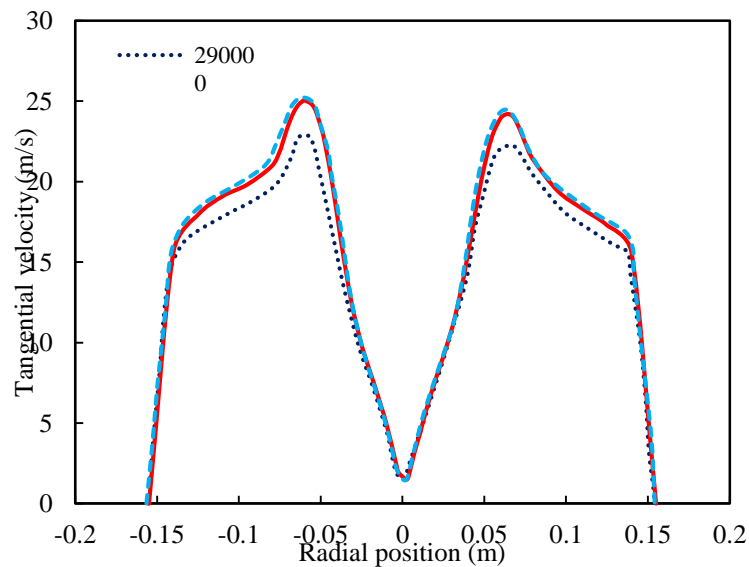
Table 3. Numerical settings of the present CFD simulation

شرایط حل عددی	تنظیمات حل عددی
جریان	ناپایا
مدل توربولانسی	RSTM
روش حل	کوپل فشار-سرعت: SIMPLEC
	گسسته سازی معادلات: فشار: PRESTO! مومنوم: Quick انرژی جنبشی توربولانس: بالادست مرتبه دوم نرخ پراکندگی ویژه: بالادست مرتبه دوم تنش های رینولدز: بالادست مرتبه اول
معیار همگرایی	10^{-5}

استقلال از شبکه

مشخص شد که سرعت مماسی تقریباً تغییر چندانی نکرده است زیرا تعداد سلول از اندازه شبکه متوسط به اندازه شبکه ریز افزایش یافته است. بنابراین، شبکه با تعداد سلول ۵۸۰۰۰۰ با توجه به دقت و هزینه شبیه سازی مناسب بوده است.

سه مقدار مختلف شبکه به ترتیب ۲۹۰۰۰۰، ۵۸۰۰۰۰ و ۱۱۶۰۰۰۰ سلول برای بررسی استقلال از شبکه انتخاب شده اند. شکل ۳، پروفیل سرعت مماسی در موقعیت $Z/D = -0.667$ برای سلول های مختلف در $v = 11.99 \text{ m/s}$ را نشان می دهد.



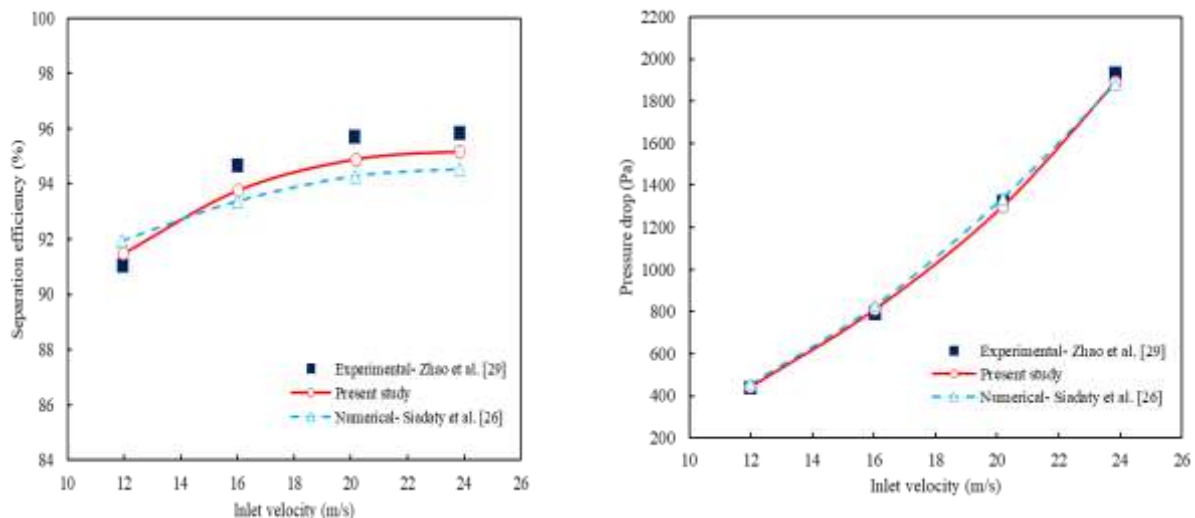
شکل ۳- پروفیل سرعت مماسی در موقعیت $Z/D = -0.667$ برای سلولهای مختلف در $v = 11.99 \text{ m/s}$

Figure 3. Tangential velocity profile at the position $Z/D = -0.667$ for different cell numbers at $v=11.99 \text{ m/s}$

اعتبارسنجی نتایج

که نتایج پیش بینی شده با داده های تجربی ژائو و همکاران (۱۰) و نتایج عددی مطالعه سیاداتی و همکاران (۲۹) مطابقت دارد. حداکثر و میانگین خطا ۳٪ و ۲٪ محاسبه شده است. با توجه به پیچیدگی جریان چرخشی توربولانس در سیکلون ها، مدل RSTM برای مطالعه حاضر توانایی خوبی داشته است.

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، لازم است نتایج پیش بینی شده با داده های تجربی مقایسه شود. نتایج شبیه سازی عددی با داده های تجربی ژائو و همکاران (۱۰) و نتایج عددی مطالعه سیاداتی و همکاران (۲۹) مقایسه شده اند. مقایسه افت فشار و راندمان جداسازی بدست آمده از مطالعه عددی حاضر با نتایج فوق به ترتیب در شکل ۴ نشان داده شده است. آشکار است



شکل ۴- مقایسه افت فشار و راندمان جداسازی مطالعه عددی حاضر با داده های تجربی ژائو و همکاران (۱۰) و نتایج عددی

مطالعه سیاداتی و همکاران (۲۹)

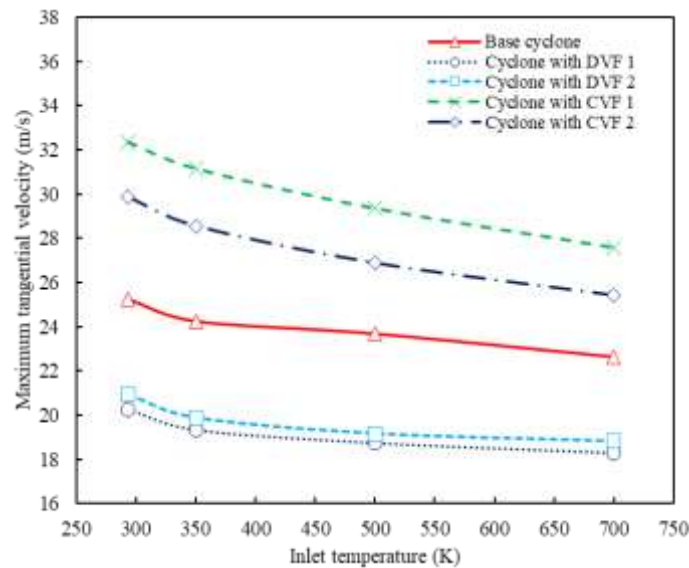
Figure 4. Comparison between the pressure drop and separation efficiency of the present study and experimental data (10), numerical results (29)

بحث و نتایج

سرعت مماسی

با افزایش دمای ورودی برای کلیه سیکلون ها اندکی کاهش یافته است. استفاده از گرداب یاب های همگرا به جای پایه، حداکثر سرعت مماسی سیکلون را در کلیه دماهای بررسی شده را به طور قابل توجهی افزایش داده است. سرعت مماسی بالاتر منجر به بهبود راندمان جداسازی می شود (۳۰).

شکل ۵ رابطه بین حداکثر سرعت مماسی و دمای ورودی برای سیکلون پایه و سیکلون با گرداب یاب واگرا (DVF) و سیکلون با گرداب یاب همگرا (CVF) را نشان می دهد. سرعت مماسی از تمامی پارامترهای جریان مهم تر می باشد، زیرا به طور مستقیم بر راندمان جداسازی و افت فشار در داخل سیکلون تأثیر می - گذارد. به وضوح می توان مشاهده کرد که حداکثر سرعت مماسی



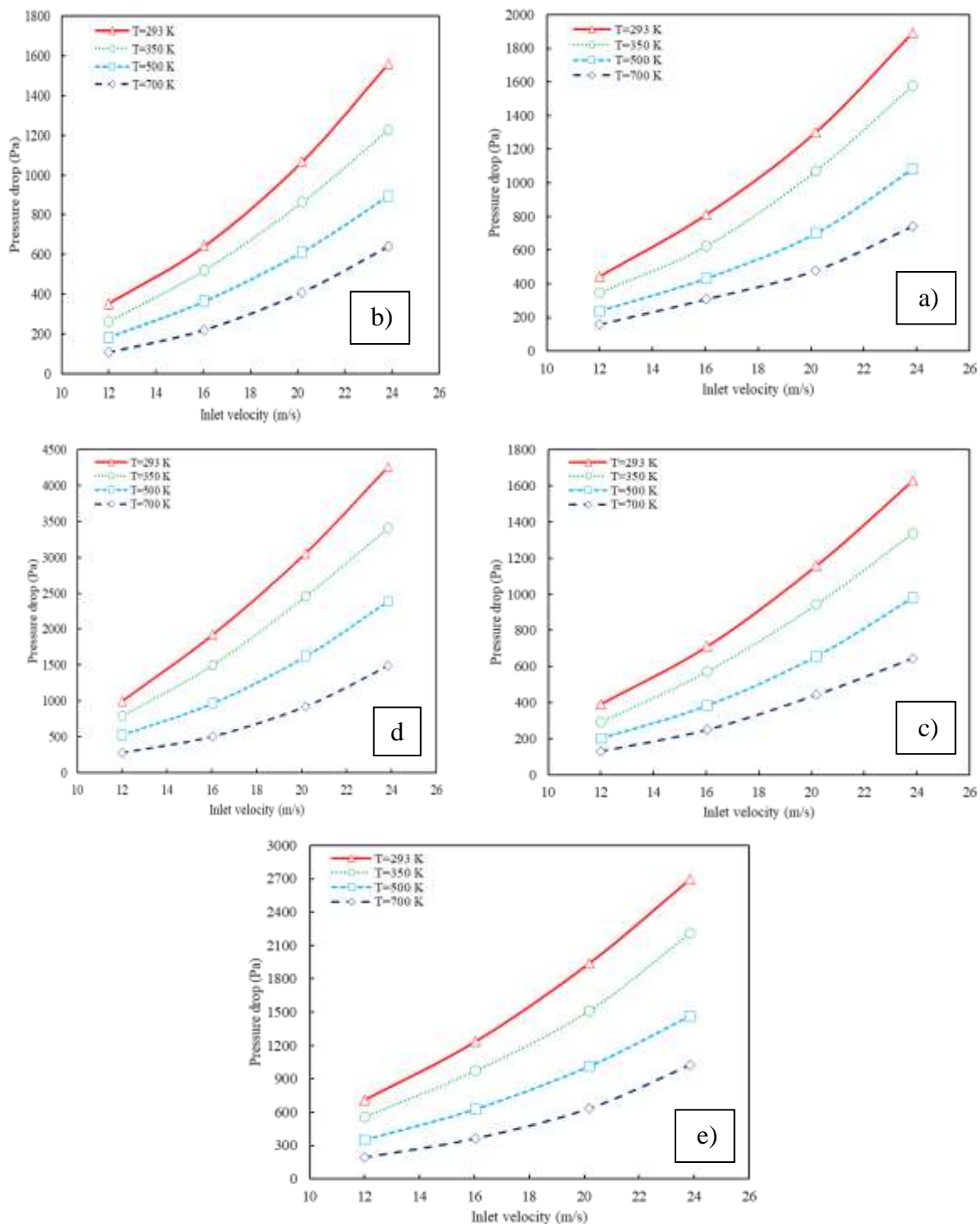
شکل ۵- مقایسه بین حداکثر سرعت مماسی تمامی سیکلون ها بر حسب دمای ورودی $v=11.99$ m/s

Figure 5. Comparison between maximum tangential velocities of all cyclones in terms of inlet temperature ($v=11.99$ m/s)

افت فشار

شده است، که در سرعت ورودی بالاتر مشهودتر بوده است در حالی که جریان چرخش قوی تر در داخل سیکلون حاکم بوده است. افزایش دمای ورودی از ۲۹۳ کلوین به ۷۰۰ کلوین باعث کاهش افت فشار با حداکثر مقادیر ۰.۶۱، ۰.۵۹، ۰.۶۰، ۰.۶۵ و ۰.۶۲؛ به ترتیب برای سیکلون پایه، سیکلون با DVF 1,2، و سیکلون با CVF 1,2 شده است. این امر می تواند با افزایش ویسکوزیته دینامیکی به دلیل افزایش دمای جریان ورودی منجر به افزایش تنش برشی و کاهش سرعت مماسی سیال در بدنه سیکلون شود. سرعت مماسی بالاتر در سیال نیز به نظر می رسد منجر به اتلاف بیشتر شود (۸)، که این دلیل افت فشار بیشتر برای دماهای پایین است.

افت فشار یکی از پارامترهای مهم در جداکننده سیکلونی است. افت فشار سیکلون به صورت اختلاف فشار بین بخش های ورودی و خروجی محاسبه می شود. افت فشار در سیکلون عموماً به دلیل اصطکاک بین جریان گاز و دیواره های سیکلون و گرداب یاب است. شکل ۶ تأثیر دما بر افت فشارهای محاسبه شده را برای سیکلون پایه و سیکلون با گرداب یاب واگرا (DVF) و سیکلون با گرداب یاب همگرا (CVF) در طیف گسترده ای از سرعت های ورودی بین ۱۱/۹۹ تا ۲۳/۸۵ متر در ثانیه نشان می دهد. به وضوح مشاهده شده که افت فشار با افزایش سرعت ورودی افزایش یافته است، همین روند در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (۳۱). نتایج پیش بینی شده نشان داد که افزایش دمای ورودی باعث کاهش چشمگیر افت فشار برای تمامی حالت ها



شکل ۶- تغییرات افت فشار بر حسب سرعت ورودی با دماهای ورودی مختلف برای الف) سیکلون پایه ب) سیکلون با

DVF 1 ج) سیکلون با **DVF 2** د) سیکلون با **CVF 1** و سیکلون با **CVF 2**

Figure 6. Variation of pressure drop versus inlet velocity with different inlet temperature for a) Base cyclone b) Cyclone with DVF 1 c) Cyclone with DVF 2 d) Cyclone with CVF 1 e) Cyclone with CVF 2

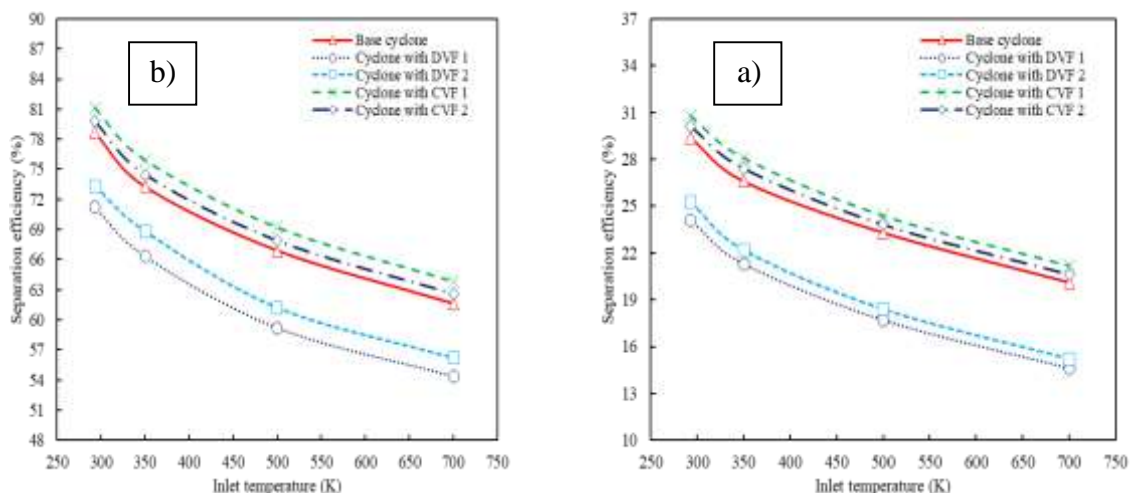
راندمان جداسازی

تأثیر دمای ورودی بر راندمان جداسازی سه سیکلون در شکل های ۷ و ۸ در دو سرعت ورودی ۱۱/۹۹ متر بر ثانیه و ۲۰/۱۸ متر بر ثانیه نشان داده شده است. راندمان جداسازی بر اساس تعداد ذرات خارج شده از خروجی پایین با استفاده از مدل DPM محاسبه شده است. راندمان جداسازی ذرات از رابطه زیر بدست آمده است:

$$t_{res} = \frac{V}{Q} \quad (10)$$

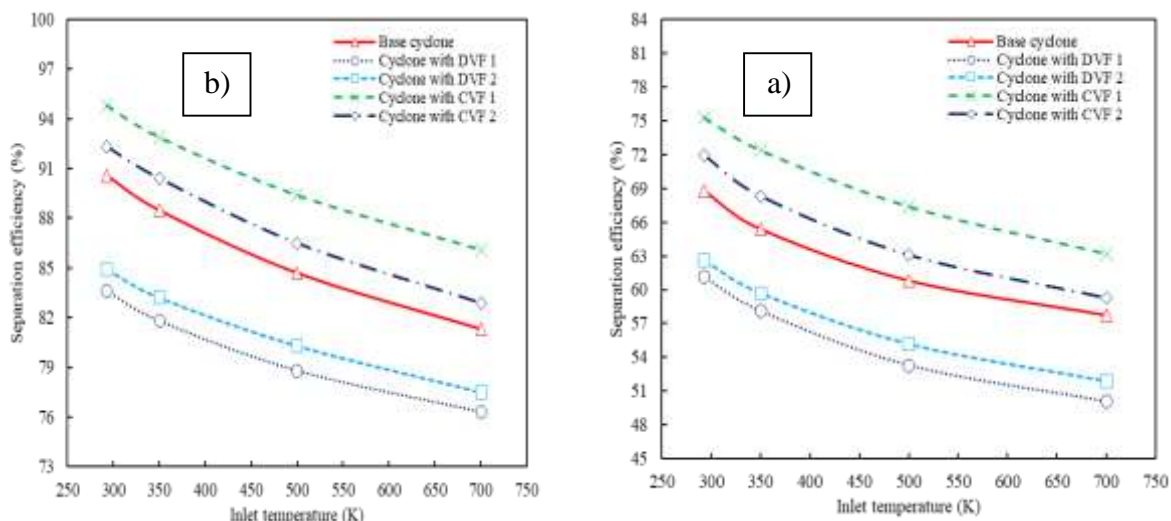
برای مقایسه بهتر از اندازه ذرات ریز (۲ میکرومتر) و بزرگتر (۶ میکرومتر) استفاده شده است. همانطور که انتظار می رود، با افزایش اندازه ذرات، راندمان جداسازی تمامی سیکلون ها افزایش می یابد. بدیهی است که افزایش دمای ورودی باعث کاهش راندمان جداسازی می شود. این به این دلیل است که با افزایش دما، سرعت مماسی کاهش یافته است. در نتیجه پیش بینی شده است که به دلیل کاهش نیروی گریز از مرکز، ذرات کمتری به دام افتاده اند. حداکثر راندمان جداسازی در کم ترین دما ($T = 293 \text{ K}$) پیش بینی شده و حداقل راندمان جداسازی در بیشترین دما ($T = 700 \text{ K}$) بدست آمده است. این مشاهدات برای تمامی سیکلون ها مشابه بوده است. علاوه بر این، با افزایش سرعت ورودی برای همه سیکلون ها، راندمان جداسازی افزایش یافته است. به طوری که راندمان جداسازی سیکلون پایه برای ذرات ۲ میکرومتر در دمای $T = 293 \text{ K}$ از ۲۹/۴٪ به ۶۸/۸٪ با افزایش سرعت ورودی از ۱۱/۹۹ متر بر ثانیه به ۲۰/۱۸ متر بر ثانیه افزایش یافته است. این امر به دلیل تولید سرعت مماسی

بالاتر است هنگامی که سرعت ورودی افزایش می یابد. سرعت مماسی بالاتر، باعث افزایش نیروی گریز از مرکز و راندمان جداسازی بیشتر سیکلون می شود (۳۰٪). مقایسه راندمان جداسازی تمامی سیکلون ها نشان داد که شکل گرداب یاب نقش مهمی در عملکرد سیکلون دارد در حالی که تنها سیکلون با CVF 1,2 مقادیر بالاتر راندمان جداسازی را نسبت به سایر سیکلون ها در هر شرایطی ایجاد می کند. این افزایش در سرعت ورودی بالاتر به دلیل نیروی گریز از مرکز بالاتر ناشی از سرعت مماسی بالاتر در سیکلون با CVF 1 مشهودتر است. از سوی دیگر، تغییر شکل گرداب یاب به واگرایی باعث می شود تا سرعت مماسی کاهش یابد. در سیکلون های دارای CVF 1,2، بازشدگی گرداب یاب منجر به از دست دادن جریان چرخشی درون سیکلون ها که باعث کاهش راندمان جداسازی در کلیه دماهای ورودی می شوند. حداکثر بهبود راندمان جداسازی به ترتیب در حدود ۹/۵٪ و ۶٪ برای ذرات ۲ میکرومتر و ۶ میکرومتر در $T = 700 \text{ K}$ و سرعت ۲۰/۱۸ متر بر ثانیه برای سیکلون با CVF 1 بدست آمده است. بنابراین، گرداب یاب همگرا پیشنهادی بازده جداسازی را به طور مثبتی به ویژه در دمای ورودی بالاتر بهبود می بخشد. استفاده از گرداب یاب CVF 1,2 به جای گرداب یاب پایه به طور قابل توجهی به سیکلون کمک می کند تا ذرات ریزتری را جمع آوری کند که نشان دهنده قابلیت استفاده در دمای ورودی بالاتر می باشد.



شکل ۷- مقایسه راندمان جداسازی تمامی سیکلون برای الف) $dP=2 \mu m$ و ب) $dP=6 \mu m$ در $v=11.99 \text{ m/s}$

Figure 7. Comparison between separation efficiencies of all cyclones for a) $dP=2 \mu m$ and b) $dP=6 \mu m$ at $v=11.99 \text{ m/s}$



شکل ۸- مقایسه راندمان جداسازی سه سیکلون برای الف) $dP=2 \mu m$ و ب) $dP=6 \mu m$ در $v=20.18 \text{ m/s}$

Figure 8. Comparison between separation efficiencies of three cyclones for a) $dP=2 \mu m$ and b) $dP=6 \mu m$ at $v=20.18 \text{ m/s}$

حد برش ۵۰٪

این، سیکلون مربعی با DVF 1 بزرگترین حد برش ۵۰٪ را در بین همه سیکلون ها ایجاد می کند. در حالی که استفاده از CVF 1 باعث کاهش حد برش ۵۰٪ در کلیه دماهای ورودی می شود. حداکثر کاهش حد برش ۵۰٪ تقریباً ۱۸٪ در $T = 700 \text{ K}$ بدست آمد که نشان داد که سیکلون با CVF 1 قادر به جمع آوری ذرات ریزتر در مقایسه با سایر سیکلون ها است.

در جدول ۴ مقایسه حد برش ۵۰٪ برای سیکلون های مربعی در $v=11.99 \text{ m/s}$ و دماهای ورودی مختلف ارائه شده است. اندازه ذره ای که در آن راندمان جداسازی سیکلون ۵۰٪ می باشد، به عنوان حد برش ۵۰٪ تعریف شده است (۳۰). همانطور که در جدول ۴ مشاهده می شود، افزایش دمای ورودی منجر به افزایش قابل توجه حد برش برای تمامی سیکلون ها شده است. علاوه بر

جدول ۴-مقایسه حد برش ۵۰٪ در $v=11.99$ m/sTable 4. Comparison of the 50% cut size at $v=11.99$ m/s

۷۰۰	۵۰۰	۳۵۰	۲۹۳	دما (کلوین)
۵/۳۳	۴/۶۶	۴/۰۷	۳/۸۸	سیکلون پایه
۵/۹۶	۵/۸۹	۴/۷۲	۴/۱۷	سیکلون با DVF 1
۵/۸۷	۵/۳۸	۴/۲۸	۳/۹۴	سیکلون با DVF 2
۴/۳۸	۴/۲۴	۳/۹۷	۳/۷۳	سیکلون با CVF 1
۵/۰۷	۴/۴۸	۴/۰۳	۳/۸۱	سیکلون با CVF 2

نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر دمای ورودی بر میدان جریان و عملکرد جداسازی یک سیکلون به طور جامع با استفاده از شبیه سازی CFD مورد بررسی قرار گرفته است. رویکرد اویلر-لاگرانژی برای شبیه سازی جریان هوا و دینامیک ذرات در سیکلون استفاده شده است. علاوه بر این، در این مطالعه چهار هندسه گرداب یاب پیشنهادی (CVF) و (DVF) مورد استفاده قرار گرفته و به منظور ارزیابی چگونگی تأثیر گرداب یاب بر عملکرد سیکلون تحت یک طیف وسیعی از دما با هندسه پایه مقایسه گردیده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که تغییرات دمای جریان ورودی بر عملکرد سیکلون تأثیر منفی گذاشته است. افزایش دمای ورودی به میزان قابل توجهی سرعت مماسی را کاهش داده و منجر به کاهش شدید راندمان جداسازی سیکلون شده است. ثابت شده است که سیکلون پیشنهادی با CVF 1 قادر به جمع آوری ذرات ریزتر (۲ میکرومتر) در دمای ورودی بالا ($T = 700$ K) بوده است. حداکثر کاهش حد برش ۵۰٪ تقریباً ۱۸٪ در $T = 700$ K با استفاده از CVF 1 بدست آمده است.

Reference

- J, Jiao., Y, Zheng., J, Wang, G, Sun., 2008. Experimental and numerical investigations of a dynamic cyclone with a rotary impeller. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 47, pp. 1861-1866.
- S, Bernardo., M, Mori., A.P, Peres., R.P, Dionisio., 2006. 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flow in a cyclone with different inlet section angles. *Powder Technology*, vol. 162, pp. 190-200.
- G, Wan., G, Sun., X, Xue., M, Shi., 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*, vol. 183, pp. 94-104.
- H, Fatahian., E, Fatahian., E., M.E, Nimvari., 2018. Improving efficiency of conventional and square cyclones using different configurations of the laminarizer. *Powder Technology*, vol. 339, pp. 232-243.
- M, Shin., H.S, Kim., D, Jang., J.D, Chung., M, Bohnet., 2005. A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments. *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 1821-1835.
- R, Xiang., S, Park., K.W, Lee., 2001. Effects of cone dimension on cyclone performance. *Journal of Aerosol Science*, vol. 32, pp. 549-561.
- Y, Zhu., K.W, Lee., 1999. Experimental study on small cyclones operating at high flow rates. *Journal of Aerosol Science*, vol. 30, pp. 1303-1315.

- cones shapes. Powder Technology, vol. 380, pp. 67-79.
16. H, Fatahian., E, Fatahian., 2020. Improving efficiency of a square cyclone separator using a dipleg – a CFD-based analysis." Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE), 10.30492/ijcce.2020.127666.4129.
 17. B.E, Launder., G, Reece., W, Rodi., 1975. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. Journal of Fluid Mechanics, vol. 68, pp. 537-566.
 18. S, Wang., M, Fang., Z, Luo., X, Li., M, Ni., K, Cen., 1999. Instantaneous separation model of a square cyclone. Powder Technology, vol. 102, pp. 65-70.
 19. A.J, Hoekstra., J.J, Derksen., H.E, Van Den Akker, 1999. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. Chemical Engineering Science, vol. 54, pp. 2055-2065.
 20. K, Jang., G, Lee., K, Huh., 2018. Evaluation of the turbulence models for gas flow and particle transport in URANS and LES of a cyclone separator. Computers & Fluids, vol. 172, pp. 274-283.
 21. M, Azadi., M, Azadi., A, Mohebbi., 2010. A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters. Journal of hazardous materials, vol. 182, pp. 835-841.
 22. S.A, Morsi., A.J, Alexander., 1972. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. Journal of Fluid mechanics, vol. 55, pp. 193-208.
 23. H, Fatahian., E, Hosseini., E, Fatahian., 2020. CFD simulation of a novel design of square cyclone with dual-inverse
 8. M, Siadaty., S, Kheradmand., F, Ghadiri., 2017. Study of inlet temperature effect on single and double inlets cyclone performance. Advanced Powder Technology, vol. 28, pp. 1459-1473.
 9. M, Wasilewski., 2016. Analysis of the effects of temperature and the share of solid and gas phases on the process of separation in a cyclone suspension preheater. Separation and Purification Technology, vol. 168, pp. 114-123.
 10. B, Zhao., H, Shen., Y, Kang., 2004. Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance. Powder Technology, vol. 145, pp. 47-50.
 11. H, Safikhani., M, Akhavan-Behabadi., M, Shams., M., M, Rahimyan., 2010. Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators. Advanced Powder Technology, vol. 21, pp. 435-442.
 12. F, Kaya., I, Karagoz., A, Avci., 2011. Effects of surface roughness on the performance of tangential inlet cyclone separators. Aerosol science and technology, 45(8), 988-995.
 13. T, Chuah., J, Gimfun, T.S, Choong., 2006. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics. Powder technology, vol. 162, pp. 126-132.
 14. K, Elsayed., C, Lacor., 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. Chemical Engineering Science, vol. 65, pp. 6048-6058.
 15. H, Fatahian., E, Fatahian., M.E, Nimvari., G, Ahmadi., 2020. Novel designs for square cyclone using rounded corner and double-inverted

28. T.L, Bergman., F.P, Incropera., D.P, DeWitt., A.S, Lavine., 2011. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons.
29. M, Siadaty., S, Kheradmand., F, Ghadiri., 2018. Research on the effects of operating conditions and inlet channel configuration on exergy loss, heat transfer and irreversibility of the fluid flow in single and double inlet cyclones. Applied Thermal Engineering, vol. 137, pp. 329-340.
30. H.I, Erol, O, Turgut., R, Unal., 2019. Experimental and numerical study of Stairmand cyclone separators: a comparison of the results of small-scale and large-scale cyclones. Heat and Mass Transfer, vol. 55, pp. 2341-2354.
31. S, Wang., H, Li., R, Wang., X, Wang., R, Tian., Q, Sun., 2019. Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM. Advanced Powder Technology, vol. 30, pp. 227-239.
- cone. Advanced Powder Technology, vol. 31, pp. 1748-1758.
24. B, Zhao., Y, Su., J, Zhang., 2006. 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, pp. 1158-1165.
25. M, Wasilewski., L.S, Brar., Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators. Separation and Purification Technology vol. 213, pp. 19-33.
26. E, Fatahian., H, Fatahian., E, Hosseini., E., G, Ahmadi., 2021. A low-cost solution for the collection of fine particles in square cyclone: A numerical analysis. Powder Technology, vol. 387, pp. 454-465.
27. H, Fatahian., E, Fatahian, M.E, Nimvari., G, Ahmadi., 2021. Novel designs for square cyclone using rounded corner and double-inverted cones shapes. Powder Technology, vol. 380, pp. 67-79.