

# مطالعه عددی تأثیر ترکیب روش‌های کنترل جریان غیر فعال به منظور بهبود عملکرد سیکلون

سعید کریمیان علی‌آبادی<sup>۱\*</sup> و آرمان مقدس‌زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

پست الکترونیک نویسنده مسؤول: [Karimian@modares.ac.ir](mailto:Karimian@modares.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

پست الکترونیک: [arman.moghaddaszadeh@gmail.com](mailto:arman.moghaddaszadeh@gmail.com)

## چکیده

سیکلون‌ها به دلیل کارایی بالا و هزینه پایین، نقش مهمی در جداسازی ذرات از جریان سیال ایفا می‌کنند. در این پژوهش، بهبود عملکرد یک سیکلون گازی با استفاده از تغییرات مرحله‌به‌مرحله در طراحی هندسی آن بررسی شد. هدف از این تغییرات، بهبود هدایت جریان و افزایش برخورد ذرات با دیواره بود که این تغییرات هندسی تحت عنوان کنترل جریان معرفی شده‌اند. ابتدا، سیکلون استیرمند به عنوان مدل پایه انتخاب شد و عملکرد آن از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) و روش اویلری-لاگرانژی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت تحلیل گردید. شبکه‌بندی به صورت سازمان‌یافته با رعایت معیارهای کیفیت شبکه انجام شد. اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های تجربی منتشرشده صورت گرفت که انطباق خوبی با نتایج شبیه‌سازی نشان داد (خطای کمتر از ۱۰٪). تغییرات طراحی در چهار بخش اصلی سیکلون شامل ورودی، گردابه‌یاب، بدنه و بخش جمع‌آوری‌کننده اعمال شد. نتایج نشان داد که ورودی با چرخش ۳۶۰ درجه، با هدایت بهتر جریان و افزایش برخورد ذرات با دیواره، بازده جداسازی را ۱۱/۵۲٪ افزایش داده و قطر برش را ۱۲/۱۴٪ کاهش داد، هرچند افت فشار به میزان ۲۲/۰۴٪ افزایش یافت. افزودن گردابه‌یاب انحنادار، با کاهش ۷/۴۹٪ افت فشار نسبت به تغییر اول، تأثیر مثبتی بر عملکرد کلی داشت. اضافه کردن میله استوانه‌ای تثبیت‌کننده گردابه در بدنه سیکلون، با کاهش نوسانات جریان، بازده جداسازی را تا ۱/۱۵٪ نسبت به مرحله قبل افزایش داد. نهایتاً، بکارگیری مخروط معکوس در بخش جمع‌آوری ذرات، منجر به بهبود در جداسازی ذرات ریز و کاهش قطر برش به ۱/۳ میکرومتر گردید. نتایج این پژوهش می‌تواند بستر مناسبی برای انجام بهینه‌سازی در سیکلون‌ها باشد و ارتقای عملکرد آن‌ها در کاربردهای صنعتی را در پی داشته باشد.

**کلمات کلیدی:** سیکلون، شبیه‌سازی عددی، کنترل جریان، بازده جداسازی، افت فشار، قطر ذرات، قطر برش

# Numerical study of the effect of combining passive flow control methods to improve cyclone performance

Arman Moghadaszadeh<sup>1</sup>, Saeed Karimian Aliabadi

faculty of mechanical engineering in Tarbiat Modares university

## Abstract

Cyclones play a crucial role in particle separation from fluid streams due to their high efficiency and low cost. In this study, the performance enhancement of a gas cyclone was investigated through step-by-step geometric modifications. These changes were aimed at improving flow guidance, reducing turbulence fluctuations and increasing particle-wall interactions to improve overall cyclone performance a concept referred to in this study as flow control. Initially, the Stairmand cyclone was selected as the baseline model, and its performance was analyzed using numerical simulations with the Reynolds Stress Model (RSM) turbulence model and the Eulerian-Lagrangian approach in ANSYS Fluent software. The mesh generation was structured and adhered to quality criteria to ensure accurate results. The numerical model was validated against published experimental data, demonstrating good agreement with less than 10% error. Geometric modifications were applied to four main sections of the cyclone: the inlet, vortex finder, body, and collection section. The results showed that the 360-degree turning inlet design, by better guiding the flow and increasing particle-wall collisions, enhanced the separation efficiency by 11.52% and reduced the cut-off diameter by 12.14%, though it caused a 22.04% increase in pressure drop. The addition of a curved vortex finder reduced the pressure drop by 7.49% compared to the first modification and had a positive overall effect. Introducing a cylindrical vortex stabilizing rod in the cyclone body reduced flow oscillations and further improved separation efficiency by 1.15% compared to the previous stage. Finally, the implementation of a reverse cone in the collection section enhanced fine particle separation, reducing the cut-off diameter to 1.3 micrometers. These findings provide a foundation for further cyclone optimizations and highlight the potential for improving their performance in industrial applications.

**Keywords:** Cyclone, Numerical simulation, Flow control, Separation efficiency, Pressure drop, Particle diameter, Cut-off diameter

## ۱- مقدمه

ذرات ریز (کوچکتر از ۵ میکرومتر) و ائتلاف انرژی ناشی از افت فشار است. به همین علت، طی سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد سیکلون‌ها از طریق اصلاح هندسه و ساختار آن‌ها انجام شده است [۱].

اولین امتیازنامه اختراع سیکلون گاز-جامد در سال ۱۸۸۵ توسط جان فینچ در ایالات متحده ثبت شد. وی برای اولین بار از نیروی گریز از مرکز جهت جداسازی ذرات استفاده کرد [۱]. در سال ۱۹۴۰، شفر و لاپل تحلیل دقیقی از جریان گردابه‌ای در سیکلون ارائه دادند و نشان دادند که بازده جداسازی ذرات مستقیماً به تعداد چرخش‌های جریان در داخل سیکلون وابسته است [۲]. در ادامه، لاپل در سال ۱۹۵۰ بهره‌گیری از قانون استوکس برای ذرات کروی، مدلی برای پیش‌بینی بازده جداسازی و افت فشار سیکلون پیشنهاد داد [۳]. الکساندر در سال ۱۹۴۹ یک مدل کاملاً تجربی برای محاسبه میدان سرعت توسعه داد که تأثیر مستقیم دما را نیز شامل می‌شد، هرچند قادر به لحاظ شکل ورودی در محاسبات نبود [۴]. در همان سال، استیرمند مدل بازده بالایی برای طراحی سیکلون معرفی کرد که تمرکز آن بر جداسازی ذرات ریز و کاهش افت

سیکلون<sup>۱</sup> به عنوان یکی از تجهیزات پرکاربرد در فرآیند جداسازی ذرات جامد از گاز، در صنایع مختلف از جمله نفت، گاز، پتروشیمی، متالورژی و معدن مورد استفاده قرار می‌گیرند. علی‌رغم ساختار ساده، الگوی جریان درون آن‌ها بسیار پیچیده است و عملکرد آن‌ها به شدت تحت تأثیر طراحی هندسی، شرایط ورودی و جریان گردابه‌ای قرار دارد. دلیل اصلی استقبال گسترده از این تجهیزات، سادگی ساخت، نداشتن قطعات متحرک، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و ظرفیت بالای عملیاتی آن‌هاست. توانایی جداسازی یک سیکلون معمولاً از طریق راندمان جمع‌آوری یا قطر برش توصیف می‌شود. راندمان جمع‌آوری  $\eta(D_p)$  به صورت نسبت جرم ذرات با قطر مشخص  $D_p$  که توسط سیکلون جدا می‌شوند به جرم همان ذرات در جریان ورودی تعریف می‌شود. از سوی دیگر، قطر برش  $d_c$  به قطری از ذرات گفته می‌شود که راندمان جمع‌آوری آن برابر با ۵۰ درصد است که هرچه مقدار  $d_c$  کوچکتر باشد، سیکلون توانایی بیشتری در جداسازی ذرات ریزتر خواهد داشت. یکی از چالش‌های مهم در استفاده از سیکلون‌ها، افت بازده در جداسازی

<sup>۱</sup> Cyclone

فشار بود و نسبت‌های هندسی خاصی را نیز برای طراحی پیشنهاد داد [۵]. بارث در دهه ۱۹۵۰ با ارائه یک مدل نیمه‌تجربی، تأثیر هندسه ورودی را در قالب یک پارامتر جدید وارد معادلات کرد و همچنین روابطی برای طول گردابه و ضریب اصطکاک ارائه داد [۶]. در ادامه، موشلناتز و همکارانش با توسعه ایده بارث، نمودارهای تجربی را با روابط تحلیلی جایگزین کرده و اثر غلظت جریان را نیز در مدل لحاظ کردند [۷]. رایدن و گووین در پژوهشی نظری و تجربی، سعی در تعمیم مدل مؤلفه مماسی سرعت برای شرایط مختلف عملیاتی داشتند [۸]. در همین راستا، دیرگو و لیث مدل‌های لاپل و بارث را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بازبینی کردند و نشان دادند که هیچ‌کدام قادر به پیش‌بینی دقیق بازده نبودند، اما پارامتر قابل تنظیم مدل لاپل برای تطبیق بهتر قابل استفاده است [۸]. در سال‌های بعد، مایسنر و لافلر مدل جدیدی برای توزیع سرعت مماسی ارائه دادند که امکان محاسبه مؤلفه‌های محوری و شعاعی را نیز فراهم می‌کرد [۹]. یوزیا و لیث نیز پنج مدل مختلف از جمله بارث و لاپل را برای پیش‌بینی قطر برش بررسی کرده و با داده‌های تجربی تطبیق دادند [۱۰، ۱۱]. در سال ۱۹۸۸، رامچاندران و همکاران با استفاده از مدل افت فشار دیرگو و بازده یوزیا-لیث، مسیر بهینه‌سازی طراحی سیکلون‌ها را بر اساس افت فشار و بازده تدوین کردند [۱۲]. از دهه ۱۹۸۰ به بعد، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۲</sup> در تحلیل عملکرد سیکلون‌ها آغاز شد که در ادامه به مطالعات جدیدتر می‌پردازیم و آن‌ها را با توجه به اجزای سیکلون که شامل ورودی، خروجی هوای تمیز و گردابه‌یاب، بدنه و بخش جمع‌آوری ذرات در ۴ تقسیم‌بندی ارائه خواهد شد.

در بخش ورودی، ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۹، از ورودی مارپیچی یکپارچه (ICBC)<sup>۳</sup> برای افزایش بازده استفاده کرده و نتایج شبیه‌سازی با به کارگیری مدل آشفتگی (RSM)<sup>۴</sup> نشان داد که این روش به‌طور قابل‌توجهی بازده را افزایش و قطر برش ( $d_{50}$ ) را کاهش می‌دهد [۱۳]. وسیلفسکی و برار در سال ۲۰۱۹ با بررسی زاویه ورودی نشان دادند که تغییر زاویه ورودی تأثیر اندکی بر بازده دارد اما افت‌فشار را افزایش می‌دهد [۱۴]. برار و همکاران در سال ۲۰۲۴، مطالعه‌ای دیگر با طراحی دو ورودی با ابعاد و موقعیت‌های مختلف، تغییرات قابل‌توجهی در بازده و افت‌فشار ثبت کردند [۱۵]. همچنین فنگ و همکاران در سال ۲۰۲۵، با معرفی نازل همگرا در ورودی، بازده را تا ۴۶٪ افزایش دادند [۱۶]. در ادامه مطالعات، فتوگا در سال ۲۰۲۳، اثر زاویه شعاعی ورودی‌ها نسبت به یکدیگر با پنج ورودی را تحلیل کرد و بیشترین بازده را برای زاویه ۶۱ درجه گزارش داد [۱۷].

در بخش گردابه‌یاب، گیو و همکاران در سال ۲۰۲۳، نشان دادند که گردابه‌یاب شکاف‌دار (SVF)<sup>۵</sup> می‌تواند افت‌فشار را تا ۲۰٪ و قطر برش را تا ۴/۲٪ کاهش دادند [۱۸]. در سال ۲۰۲۳ لی و همکاران با بررسی شکل و زاویه گردابه‌یاب و همچنین ساختار سقف سیکلون (ACR)<sup>۶</sup>،

کاهش افت فشار و بهبود بازده تا ۲۵٪ را گزارش کردند [۱۹، ۲۰]. کومار نیز در سال ۲۰۱۹، با طراحی گردابه‌یاب همگرا-واگرا و بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک، افت‌فشار را تا ۵۸٪ کاهش داد [۲۱]. پی و همکاران در سال ۲۰۱۷، نشان دادند که تیغه‌های داخل گردابه‌یاب می‌تواند افت‌فشار را تا ۱۶/۴٪ کاهش دهد [۲۲].

در بخش بدنه، یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳، با نصب تیغه‌های مارپیچی مثلثی روی بدنه، کاهش ۳۰٪ قطر برش و افزایش بازده برای ذرات ۰/۱ تا ۳ میکرومتر را گزارش کرد [۲۳]. ژو و همکاران در سال ۲۰۱۸، با استفاده از پره‌های مارپیچی راهنما، نشان داد که چرخش این پره‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر مسیر جریان، کاهش آشفتگی و افزایش بازده دارد [۲۴]. پندی و همکاران در سال ۲۰۲۲ با بررسی اشکال مختلف مخروط پایینی بدنه، مشخص کرد که طراحی محدب در نرخ جریان بالا عملکرد بهتری دارد [۲۵]. دوان و همکاران در سال ۲۰۲۰ با افزودن تثبیت‌کننده گردابه استوانه‌ای، افزایش ۵/۵٪ بازده برای ذرات ریز و کاهش نوسانات میدان جریان را گزارش دادند [۲۶]. وسیلفسکی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۳، با تزریق هوای پاک محوری از سقف سیکلون، منجر به افزایش ۴/۷٪ در بازده جمع‌آوری و افزایش ۶٪ در افت‌فشار شد و قطر برش تا ۳۳/۶٪ کاهش داد [۲۷].

در بخش جمع‌آوری، دهداری‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۲۳، استفاده از مخروط جامد هیبریدی معکوس پیچ‌خورده (TIHSC)<sup>۷</sup> را در بخش جمع‌آوری ذرات اعمال نمودند که حالت بهینه باعث کاهش اندازه قطر برش ذرات از ۰/۹۷ به ۰/۸۵ میکرومتر برای جداسازی ۵۰ درصد و از ۶/۲ به ۴/۷ میکرومتر برای جداسازی ۱۰۰ درصد شد، در حالی که افت‌فشار ۱۲/۷ درصد کاهش یافت [۲۸]. الساید و همکاران در سال ۲۰۲۰ با اصلاح ارتفاع، طول و قطر محفظه پایین، بهترین نسبت‌ها برای کاهش افت فشار را معرفی کردند [۲۹]. پرواز و همکاران در سال ۲۰۲۰ با تحلیل هندسه‌های مختلف مجرای تخلیه، نشان داد که طراحی مخروطی معکوس بیشترین بازده را دارد [۳۰]. سان و همکاران در سال ۲۰۲۴، با ترکیب مجرای تخلیه و بخش جمع‌آوری ذرات، بازده را برای ذرات ریز افزایش دادند [۳۱]. در پایان، پرواز و همکاران در سال ۲۰۱۸، با افزودن مخروط داخلی با ارتفاع مناسب، کاهش فرسایش و کاهش افت فشار را گزارش کردند [۳۲].

هدف این پژوهش، بهبود عملکرد سیکلون با تمرکز بر کنترل جریان از طریق ترکیب اصلاحات هندسی در چهار ناحیه کلیدی شامل ورودی، بدنه، گردابه‌یاب و بخش جمع‌آوری ذرات است. برخلاف مطالعات پیشین که اغلب فقط به بهینه‌سازی یک بخش پرداخته‌اند، این تحقیق به بررسی هم‌زمان و ترکیبی این بخش‌ها می‌پردازد. ابتدا شبیه‌سازی با هندسه پایه سیکلون به‌منظور اعتبارسنجی با نتایج آزمایشگاهی انجام می‌شود. سپس تأثیر هر تغییر به‌صورت مستقل بررسی شده و در نهایت، تحلیل ترکیبی تغییرات انجام خواهد شد تا مشخص شود آیا بین آن‌ها

<sup>۱</sup> Arc-shaped Cylinder Roof  
<sup>۲</sup> twisted inverted hybrid solid cone

<sup>۳</sup> Integrated compact-bend cyclone  
<sup>۴</sup> Computational Fluid Dynamics  
<sup>۵</sup> Reynolds stress model (RSM)  
<sup>۶</sup> Slotted Vortex Finder

اثر هم‌افزایی وجود دارد یا خیر. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در این مطالعه، علاوه بر کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی، امکان ارزیابی دقیق عملکرد سیکلون را فراهم می‌کند. این پژوهش، با ارائه رویکردی نوآورانه و دقیق، می‌تواند راهکارهای مؤثری برای طراحی سیکلون‌های نسل جدید با بازده بالا و افت فشار پایین در اختیار صنعت قرار دهد.

## ۲- سیکلون مبنا

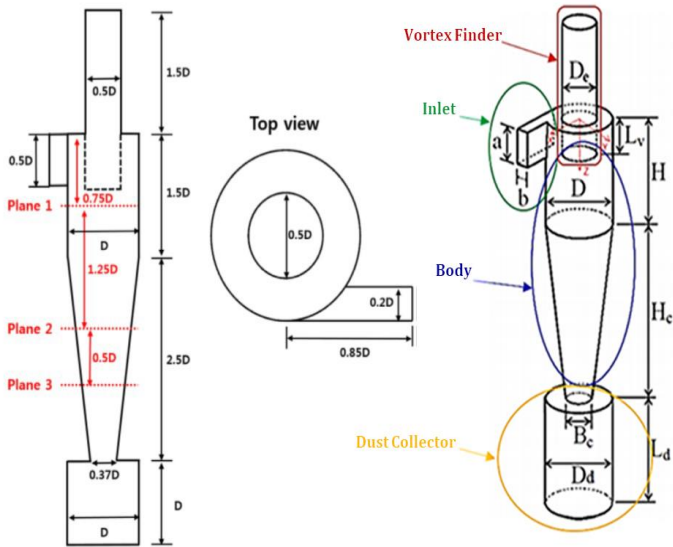
در این مطالعه، از یک سیکلون استیرمند<sup>۸</sup> به‌عنوان هندسه پایه برای شبیه‌سازی و تحلیل استفاده شده است. سیکلون‌ها به دلیل طراحی ساده و بازدهی بالا در جداسازی ذرات معلق، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند و در بسیاری از مطالعات و پژوهش‌ها نیز به کار گرفته شده است. هندسه سیکلون استیرمند به‌عنوان یکی از هندسه‌های استاندارد و پرستفاده در تحقیقات انتخاب شده است. این نوع سیکلون به دلیل تعادل بهینه بین بازده جداسازی و افت‌فشار، در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای اصلی هندسه سیکلون شامل قطر بدنه، ارتفاع بخش استوانه‌ای، طول و عرض ورودی، قطر و ارتفاع خروجی گاز و سایر ابعاد استاندارد آن می‌باشد که تمامی این ابعاد نسبتی از قطر اصلی بدنه سیکلون می‌باشد. در شکل (۱)، نمای کلی از این هندسه ارائه شده است. جدول (۱) نیز مقادیر دقیق این ابعاد را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ ابعاد و هندسه سیکلون مبنا [۳۳]

Table ۱ geometry of the benchmark cyclone

| Quantity | Value  |
|----------|--------|
| D        | ۲۹۰ mm |
| $D_c/D$  | ۰.۵    |
| $B_c/D$  | ۰.۳۷۵  |
| $D_d/D$  | ۱      |
| $H/D$    | ۱.۵    |
| $H_c/D$  | ۲.۵    |
| $L_d/D$  | ۱      |
| $L_v/D$  | ۰.۵    |
| $L_i/D$  | ۰.۸۵   |
| $a/D$    | ۰.۵    |
| $b/D$    | ۰.۲    |

<sup>۸</sup> Stairmand



شکل ۱ نمایی از سیکلون مبنا و پارامترهای هندسی [۳۴]  
Figure ۱ schematic of the benchmark cyclone and its geometric parameters

## ۳- معادلات حاکم

### ۳-۱ معادلات حاکم بر جریان

حرکت جریان سیال توسط معادلات ناور استوکس که شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی می‌باشد که در این پژوهش از اثرات دما و معادله انرژی صرف‌نظر می‌شود. جریان فاز پیوسته، تراکم ناپذیر فرض می‌شود و برای جریان تراکم ناپذیر معادلات (۱) و (۲) بدست می‌آید [۳۶، ۳۵]. معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

و معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (۲)$$

که در آن  $u_i$  مولفه‌های میدان سرعت،  $p$  فشار استاتیک بر حسب پاسکال،  $\rho$  چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $t$  زمان بر حسب ثانیه،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال و  $\tau_{ij}$  تنش‌های رینولدز نامیده می‌شوند.

### ۳-۲ معادلات حاکم بر مدل تنش رینولدز (RSM)

مدل تنش رینولدز (RSM) مدلی است که قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار جریان گاز در سیکلون می‌باشد [۳۷، ۳۸]. این مدل برخلاف سایر

از طریق انتگرال گیری از معادله نیروها شامل نیروی پسا و گرانش طبق قانون دوم نیوتن محاسبه می شود. این روش امکان تحلیل دقیق توزیع و رفتار ذرات درون سیکلون را فراهم می کند. معادله حاکم بر حرکت ذرات در مدل فاز گسسته مطابق قانون دوم نیوتن در معادله (۶) نمایش داده شده است [۳۹، ۳۰].

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = F_D(u_i - u_{p,i}) + g_i(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_i / \rho_p \quad (6)$$

ترم های سمت راست معادله به ترتیب نشان دهنده نیروی پسا، نیروی گرانش و نیروهای اضافی دیگر می باشد. این معادله در سه راستای مختصات به شکل های زیر نوشته می شود [۳۹، ۳۰]:

$$\frac{du_P}{dt} = F_D(u_i - u_P) + \frac{v_P^2}{r_o} \quad (7)$$

$$\frac{dv_P}{dt} = F_D(v - v_P) - \frac{u_P v_P}{r_o} \quad (8)$$

$$\frac{dw_P}{dt} = F_D(w - w_P) - g \quad (9)$$

در روابط بالا  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب سرعت سیال در سه جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  می باشد و تمام پارامترها با اندیس  $P$  به معنای سرعت ذره و متعلق به ذره می باشد. ترم های  $\frac{v_P^2}{r_o}$  و  $\frac{u_P v_P}{r_o}$  به ترتیب نشان دهنده اجزاء گریز از مرکز و شتاب ذره می باشد.  $F_D$  که نیروی پسا بر واحد جرم ذرات است نیز طبق رابطه (۱۰) محاسبه می گردد [۳۹، ۳۰]:

$$F_D = \frac{18}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} \quad (10)$$

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

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

در رابطه (۱۰)،  $\rho_p$  و  $d_p$  به ترتیب چگالی و قطر ذره می باشد و  $Re_p$  عدد رینولدز ذره است که به صورت زیر تعریف می شود [۳۹، ۳۰]:

$$Re_p = \rho \frac{|\bar{u}_P - \bar{u}| d_p}{\mu} \quad (11)$$

مدل ها، فرض همسانگرد بودن آشفتگی را حذف کرده و از معادلات انتقال برای هر یک از تنش های رینولدز استفاده می کند. نتایج شبیه سازی های انجام شده با این مدل، تطابق بسیار خوبی با داده های تجربی دارند و امکان پیش بینی دقیق الگوی جریان آشفته، پروفایل سرعت محوری و مماسی، قطر برشی و افت فشار در سیکلون را فراهم می کنند. مطالعات مختلفی موفقیت کاربرد این مدل را تأیید کرده اند و مدل RSM به عنوان یکی از دقیق ترین مدل ها برای شبیه سازی جریان های آشفته در سیکلون شناخته می شود و مدل توربولانسی هفت معادله ای تنش رینولدز بهتر از مدل های قبلی می تواند نتایج را پیش بینی کند. سایر مدل های RANS با این فرض صحیح هستند که آشفتگی همگن باشد یعنی در تمام جهات انتشار آشفتگی یکنواخت است. اما این پیش فرض مطابق با فیزیک جریان در سیکلون ها نیست. لذا مدل آشفتگی باید همزمان، معادلات انتقال برای هر تنش رینولدز و معادلات نرخ اتلاف را حل کند؛ که در جریان سه بعدی منجر به هفت معادله اضافی می شود که در ادامه به آن خواهیم پرداخت [۳۵]:

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \bar{U}_k \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} \right) - \left[ R_{ik} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_k} \right] - \left[ c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) + c_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad (3)$$

که  $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$  تانسور تنش رینولدز است. مدل RSM معادلات انتقال دیفرانسیلی را برای ارزیابی مولفه های تنش به کار می برد که در آن عبارت اول در سمت راست تساوی، نفوذ، عبارت دوم، تولید آشفتگی است که به صورت رابطه (۴) تعریف می شود و عبارت سوم، کرنش فشاری و عبارت پنجم نرخ اتلاف نیز در رابطه (۵) آمده است [۳۵].

که در آن  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی، مولفه های سرعت جریان با  $u_j$ ، مختصات مکان با  $x_j$  تعیین می شوند.  $P$  به تولید انرژی آشفتگی مانند اصطکاک اشاره دارد. در معادلات بالا  $C_{\varepsilon 1}$ ،  $C_{\varepsilon 2}$ ،  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  ضرایب ثابت هستند و مقدار آن ها به ترتیب ۱/۹۲، ۱/۴۴، ۱/۸، ۱/۶، ۱/۲ و ۱ است [۳۵].

### ۳-۳ معادلات حاکم بر فاز گسسته

در روش اویلری-لاگرانژی، ابتدا میدان جریان سیال با استفاده از معادلات ناویر-استوکس برای فاز پیوسته حل می شود، سپس مسیر حرکت ذرات فاز گسسته با مدل فاز گسسته (DPM)<sup>۱</sup> و بر پایه چارچوب مرجع لاگرانژی ردیابی می گردد. در این مدل، ذرات به صورت کروی، غیرچرخان، با غلظت رقیق و بدون برهم کنش متقابل در نظر گرفته می شوند و برخورد آن ها با دیواره ها کاملاً الاستیک فرض می شود. با فرض کوپلینگ یک طرفه و بی تأثیری ذرات بر جریان سیال، مسیر ذرات

<sup>۱</sup> Discrete phase model

**Figure ۲ Cyclone geometry design (left), preparation of the cyclone geometry for simulation (middle), and structured computational mesh (right).**

مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) با تابع دیواره استاندارد برای شبیه‌سازی جریان انتخاب شد، زیرا قابلیت بالاتری در مدل‌سازی جریان‌های چرخشی و گردابه‌ای داخل سیکلون دارد. شرایط مرزی شامل ورودی با سرعت ۱۶/۱ متر بر ثانیه، خروجی آزاد و دیواره بدون لغزش تعریف شدند که خلاصه آن در جدول (۲) آمده است. انتخاب الگوهای گسسته‌سازی<sup>۱۴</sup> تأثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی دارد. انسیس فلوئنت، حلگرهای بسیاری برای الگوهای گسسته‌سازی مختلف، کوپل فشار-سرعت، فشار، اندازه حرکت، انرژی جنبشی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی پیشنهاد می‌دهد. الگوی گسسته‌سازی سیمپل‌سی<sup>۱۵</sup> برای کوپل فشار-سرعت استفاده شده است که موجب همگرایی بهتری می‌شود. برای گسسته‌سازی فشار نیز از الگوی میان‌بایی پرستو<sup>۱۶</sup> استفاده شده است که تنها الگویی است که با دقت می‌تواند پروفیل سرعت میانگین، توزیع فشار استاتیک و افت فشار در سیکلون‌ها را با انطباق خوبی نسبت به داده‌های تجربی پیش‌بینی کند. برای گسسته‌سازی اندازه حرکت، انرژی جنبشی و اتلاف توربولانس از الگوی مرتبه دو بالادست<sup>۱۷</sup> استفاده شد. از الگوی گسسته‌سازی مرتبه اول بالادست<sup>۱۸</sup> برای معادلات تنش‌های رینولدز استفاده می‌شود که در جدول (۳) آورده شده است [۴۰].

**جدول ۲ شرایط مرزی در مساله سیکلون**  
**Table ۲ boundary conditions in cyclone problem**

| Boundary       | Boundary Condition Type | Description                                                                 |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Inlet          | Velocity Inlet          | Inlet velocity: ۱۶,۱ m/s; using hydraulic diameter and turbulence intensity |
| Outlet         | Outflow                 | Natural outlet allowing flow to exit without additional constraints         |
| Other surfaces | Wall                    | No-slip wall                                                                |

**جدول ۳ روش و تنظیمات حل عددی**  
**Table ۳ the adjustments in the numerical method**

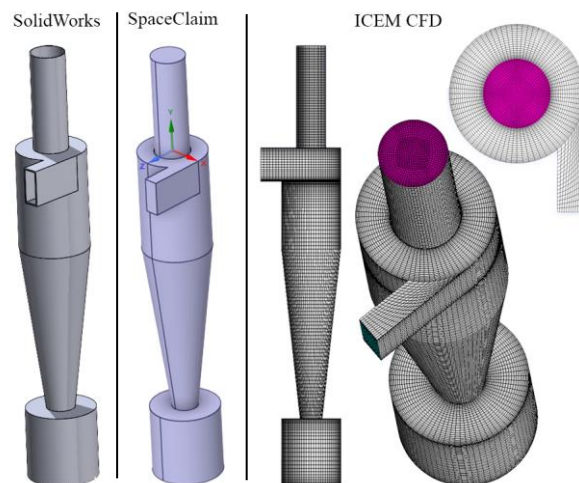
| Variable                    | Selected Method     | Description                                    |
|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------|
| Pressure-velocity coupling  | Simple-C            | Suitable for steady flow with fast convergence |
| Pressure discretization     | PRESTO              | Optimized for swirling flows                   |
| Momentum and kinetic energy | Second-Order Upwind | Higher accuracy for other variables            |
| Reynolds stress             | First-Order Upwind  | Improves solver convergence                    |

ضریب پسا وارد بر ذره که با  $C_D$  نشان داده می‌شود، با توجه به محدوده عدد رینولدز در سه حالت محاسبه می‌گردد [۳۰، ۴۰]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_P}, & Re_P \leq 1 \\ \frac{24(1+0.15Re_P^{0.687})}{Re_P}, & 1 < Re_P \leq 1000 \\ 0.44, & Re_P > 1000 \end{cases} \quad (۱۲)$$

#### ۴- شبکه محاسباتی و اعتبارسنجی حل جریان

در این بخش، شبیه‌سازی عددی سیکلون گازی استیرمند با هدف تحلیل دقیق رفتار جریان و ارزیابی عملکرد جداسازی ذرات انجام شد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا هندسه سیکلون معرفی شده و سپس فرآیند شبکه‌بندی و شرایط شبیه‌سازی تشریح می‌شوند. در ادامه، برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی، استقلال از شبکه بررسی شده و سپس نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه می‌گردد. در پایان نیز با تحلیل استقلال از تعداد ذرات، اعتبار شبیه‌سازی‌ها به‌طور کامل ارزیابی خواهد شد. هندسه سیکلون مورد استفاده در این پروژه، با حفظ نسبت‌های استاندارد طراحی شده و تمامی ابعاد به‌صورت پارامتریک و دقیق در نرم‌افزار سالیدورکس<sup>۱۰</sup> طراحی و ترسیم شده و آماده‌سازی آن برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار اسپیس کلیم<sup>۱۱</sup> صورت گرفته است. این هندسه سپس فرآیند شبکه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار آپسم<sup>۱۲</sup> سی‌افدی<sup>۱۳</sup> انجام شد و این روند در شکل (۲) نشان‌دهنده شده است، که مبنای اصلی برای شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت<sup>۱۴</sup> بوده است.



**شکل ۲ طراحی هندسه سیکلون (سمت چپ)، آماده‌سازی هندسه سیکلون برای شبیه‌سازی (وسط) و شبکه محاسباتی سازمان‌یافته (سمت راست)**

<sup>۱۰</sup> SIMPLC (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent)

<sup>۱۱</sup> PRESTO (PREssure STaggering Option)

<sup>۱۲</sup> second-order upwind

<sup>۱۳</sup> first-order upwind

<sup>۱۰</sup> Solid Works

<sup>۱۱</sup> Space Claim

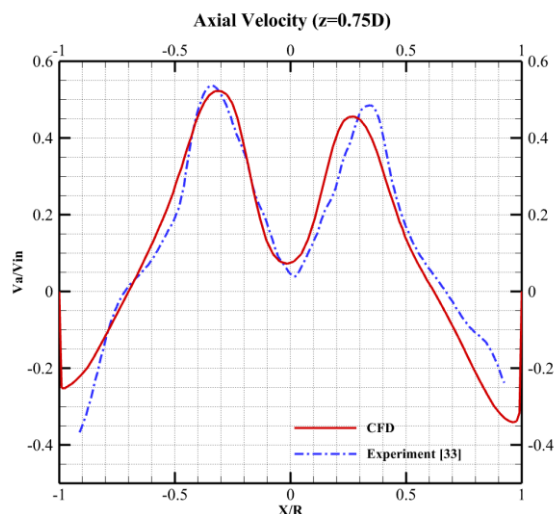
<sup>۱۲</sup> ICEM CFD

<sup>۱۳</sup> ANSYS Fluent

<sup>۱۴</sup> discretization scheme

شکل ۴ اعتبارسنجی نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی برای سرعت مماسی در مقطع  $Z=0.75D$  [۳۳]

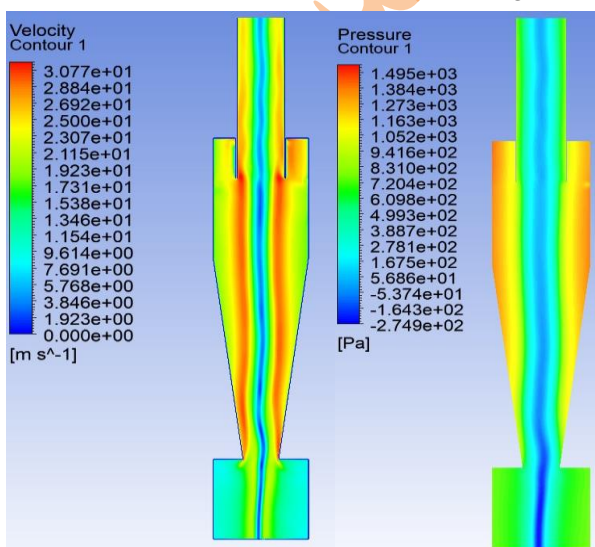
Figure ۴ Validation of numerical results against experimental data for tangential velocity at the  $Z = 0.75D$  section



شکل ۵ اعتبارسنجی نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی برای سرعت محوری در مقطع  $Z=0.75D$  [۳۳]

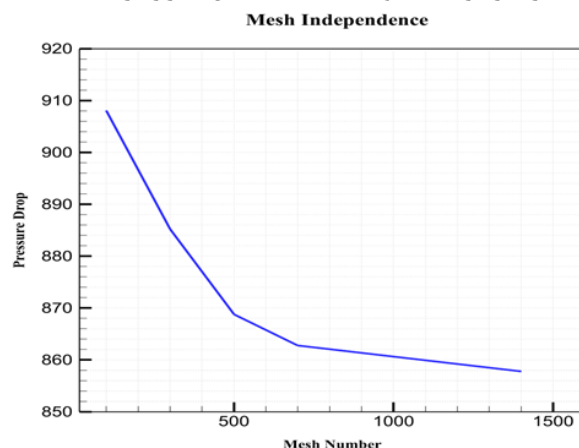
Figure ۵ Validation of numerical results against experimental data for axial velocity at the  $Z = 0.75D$  section

علاوه بر آن، توزیع فشار و سرعت درون محفظه سیکلون نیز با استفاده از کانتورهای دوبعدی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیشینه فشار در ناحیه ورودی و افت فشار قابل‌توجه در مرکز سیکلون به‌درستی توسط مدل پیش‌بینی شده است. همچنین نتایج تمرکز جریان در راستای محور مرکزی و گرادیان فشار شعاعی، شکل‌گیری ساختار گردابه‌ای پایدار و مکش مرکزی را به‌خوبی نشان دادند (شکل ۶).



شکل ۶ کانتور فشار و سرعت در حالت کارکرد نامی با هندسه مینا  
Figure ۶ the velocity and pressure contour in the nominal condition

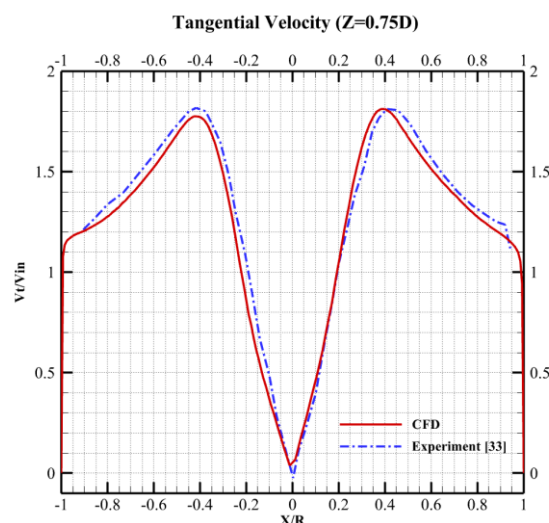
در راستای اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، پیش از انجام فرآیند اعتبارسنجی، ابتدا تحلیل استقلال از شبکه انجام گرفت. برای این منظور، هندسه سیکلون با شبکه‌هایی در اندازه‌های مختلف، از ۱۰۰ هزار تا ۱/۴ میلیون سلول شبکه‌بندی شد و تغییرات افت فشار و سرعت محوری و مماسی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از نقطه‌ای به بعد (شبکه با حدود ۵۰۰ هزار سلول)، تغییرات افت فشار بسیار جزئی بوده و عملاً نتایج شبیه‌سازی به پایداری عددی رسیده‌اند (شکل ۳). بنابراین شبکه با ۵۰۰ هزار سلول به‌عنوان شبکه بهینه در نظر گرفته شد و مبنای ادامه تحلیل‌ها قرار گرفت.

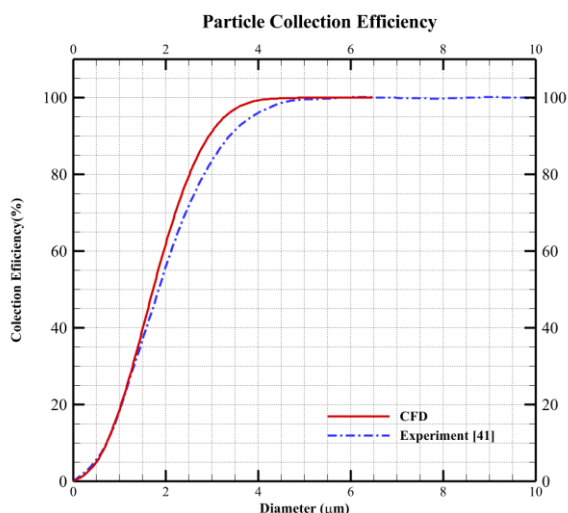


شکل ۳ نمودار استقلال از شبکه با معیار افت فشار

Figure ۳ Grid-independence plot based on pressure drop criterion

پس از تثبیت ساختار شبکه، مرحله اصلی اعتبارسنجی با مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی آغاز شد. نخست، توزیع سرعت‌های مماسی و محوری در مقطع  $Z = 0.75D$  سیکلون مورد ارزیابی قرار گرفت. این سرعت‌ها به‌صورت بی‌بعد بر حسب نسبت شعاعی محاسبه شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش تطبیق داده شدند. تطابق بسیار مناسب بین داده‌های عددی و تجربی (شکل ۴) و (۵)، توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار چرخشی جریان درون سیکلون را تأیید کرد.

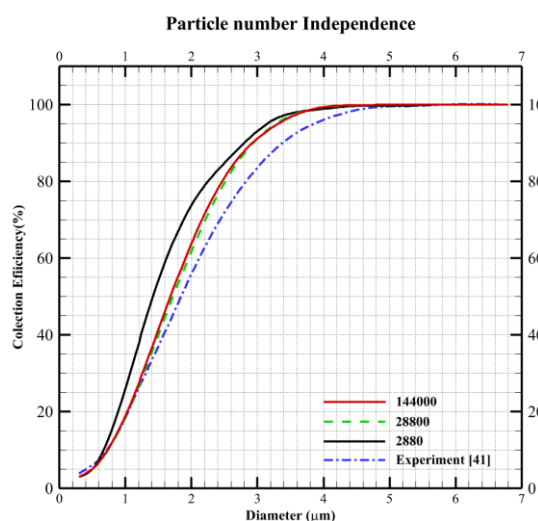




شکل ۸ مقایسه حالت آزمایشگاهی و حل عددی نمودار بازدهی جداسازی ذرات [۴۱]

Figure ۸ validation of the numerical simulation versus experimental data-separation efficiency

در نهایت، به منظور بررسی تأثیر تعداد ذرات بر نتایج و حصول اطمینان از استقلال مدل از این پارامتر، شبیه‌سازی‌ها با سه مقدار مختلف شامل ۲۸۸۰، ۲۸۸۰۰ و ۱۴۴۰۰۰ بسته ذره انجام شد.

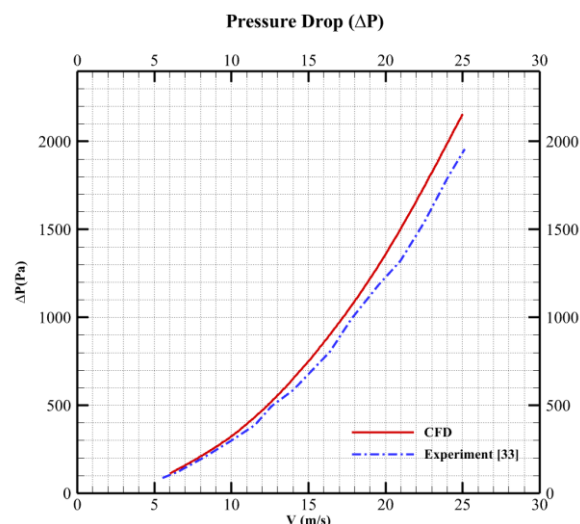


شکل ۹ مطالعه استقلال از تعداد ذرات در حالت مینا

Figure ۹ independence study for the particle numbers in the benchmark cyclone

نتایج منعکس شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که پس از یک مقدار مشخص، افزایش بیشتر تعداد بسته‌ها تأثیر قابل‌توجهی در نتایج نداشته و مدل به پایداری عددی رسیده است. این یافته همچنین استفاده از مدل کوپلینگ یک‌طرفه را از نظر دقت و کارایی محاسباتی تأیید می‌کند.

در مرحله بعد، برای بررسی دقت پیش‌بینی افت فشار، شبیه‌سازی‌ها در پنج سرعت ورودی مختلف شامل ۶، ۱۰، ۱۶/۱، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه انجام شد و نتایج با مقادیر تجربی مقایسه گردیدند. نمودار حاصل شکل (۷) بیانگر انطباق مطلوب بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی بود. همچنین، روند افزایشی افت فشار با افزایش سرعت ورودی به‌درستی توسط مدل عددی بازتولید شده است.



شکل ۷ مقایسه افت فشار بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و حل عددی با شبکه‌ای حاوی ۵۰۰ هزار سلول [۳۳]

Figure ۷ validation of the numerical simulation versus experimental data-pressure drop

در ادامه فرآیند اعتبارسنجی، عملکرد سیکلون در جداسازی ذرات بررسی شد. برای این منظور، سیکلون با قطر ۰/۳ متر، مطابق با شرایط فیزیکی آزمایش‌های تجربی مرجع و با حفظ تمامی نسبت‌های هندسی طراحی شده و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از خواص پودر تالک انجام گرفت. بازده جدایش برای ذرات در اندازه‌های مختلف محاسبه و با داده‌های تجربی مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده انطباق مناسب بین دو مجموعه داده بوده و دقت مدل عددی در پیش‌بینی کارایی جدایش ذرات را نیز تأیید کرد (شکل ۸).

جداگانه و ترکیبی ارزیابی شده‌اند و نتایج نشان داد که هرکدام تأثیر مثبتی بر عملکرد سیکلون داشته‌اند. اگرچه اثر برخی تغییرات بر یکدیگر هم‌افزایی نداشته، اما در مجموع ترکیب آن‌ها منجر به افزایش کارایی سیکلون شده است. این نتایج می‌تواند پایه‌ای برای طراحی‌های نوین در سیکلون‌های صنعتی باشد.

## ۶- تحلیل نتایج

در تحلیل نتایج، عملکرد سیکلون پایه استیرمند تحت تأثیر چهار تغییر هندسی مرحله به مرحله شامل ورودی، گردابه‌یاب، بدنه و بخش جمع‌آوری ذرات، با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه با داده‌های تجربی بررسی شده است. هدف بهبود بازده جداسازی، کاهش قطر برش و حفظ افت فشار در محدوده قابل قبول، می‌باشد.

### ۶-۱ نتایج اعمال تغییرات در ورودی سیکلون

در این بخش، تأثیر طراحی ورودی مارپیچی یکپارچه با زاویه چرخش ۳۶۰ درجه (ICBC) بر عملکرد سیکلون پایه استیرمند بررسی شده است. این طراحی که پیش‌تر توسط ژائو و همکاران [۱۳] پیشنهاد شده که در شکل (۱۱) قابل مشاهده می‌باشد، با هدایت بهتر جریان و ذرات به سمت دیواره‌ها، موجب افزایش بازده جداسازی به میزان ۱۱/۵۲٪ و کاهش قطر برش تا ۱۲/۱۴٪ شده است. شبیه‌سازی عددی نتایج قابل توجهی در بهبود جداسازی ذرات ریز نشان داد، هرچند افت فشار نیز به میزان ۴/۰۲٪ افزایش یافت. با توجه به اهمیت جداسازی مؤثر ذرات ریز در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، این افزایش افت فشار در برابر بهبود بازده قابل توجیه ارزیابی شد. این مرحله به عنوان گام ابتدایی در بهینه‌سازی گام به گام هندسه سیکلون انجام گرفت و مبنایی برای اصلاحات بعدی در سایر بخش‌ها فراهم ساخت. در نمودار شکل (۱۵) و جدول (۴) تغییرات بازده جداسازی بر حسب قطر ذرات و همچنین مقایسه مدل پایه و طراحی با ورودی مارپیچی ۳۶۰ درجه را نشان می‌دهد.

جدول ۴ نتایج تغییرات در هندسه ورودی سیکلون

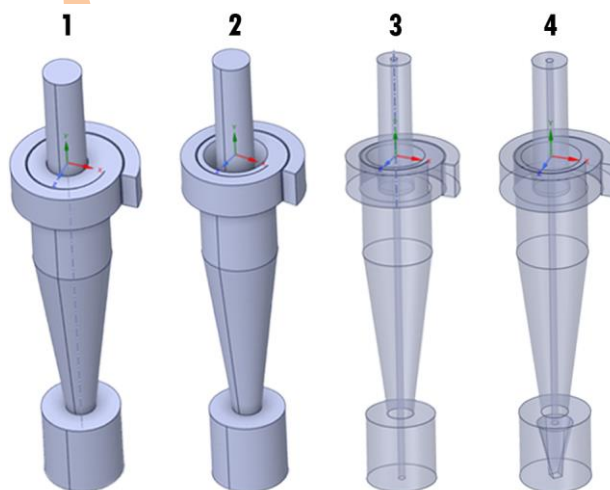
Table 4 result for the change in the cyclone inlet geometry

| Performance Parameter     | Base Case | New Value (Percentage Change (%)) |
|---------------------------|-----------|-----------------------------------|
| Pressure drop (Pa)        | ۱۳۸۶,۳    | ۱۶۹۱,۹۱(+۲۲,۰۴٪)                  |
| Separation efficiency (%) | ۷۶,۳۵     | ۸۵,۱۵(+۱۱,۵۲٪)                    |
| Cut-off diameter (μm)     | ۱,۷۳      | ۱,۵۲(-۱۲,۴٪)                      |

در مجموع، مقایسه نتایج عددی و تجربی در سطوح مختلف تحلیل جریان و عملکرد جداسازی، نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل عددی و تنظیمات اعمال شده در این پژوهش است. این اعتبارسنجی، مبنای اطمینان بخشی برای استفاده از مدل شبیه‌سازی شده در ادامه پژوهش، به منظور بررسی تغییرات هندسی و بهینه‌سازی عملکرد سیکلون فراهم کرده است.

## ۵- نتایج اعمال تغییرات روی سیکلون

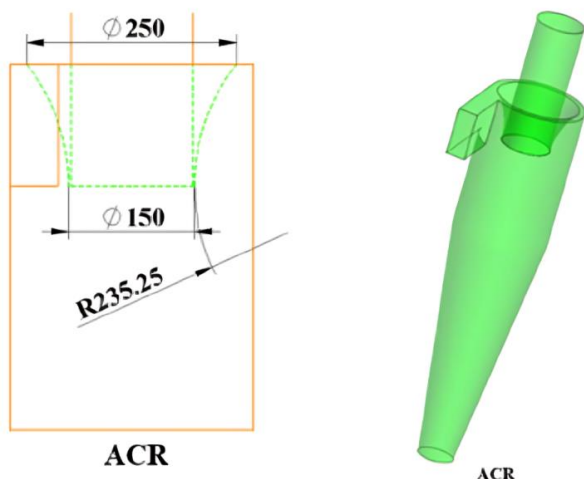
در این بخش، تأثیر اعمال چهار تغییر هندسی به صورت مرحله‌ای بر عملکرد سیکلون پایه استیرمند بررسی شده است. تغییرات به ترتیب در چهار بخش اصلی سیکلون شامل ورودی، گردابه‌یاب، بدنه و بخش جمع‌آوری ذرات اعمال شده‌اند. هدف از این تغییرات، کنترل بهینه جریان داخلی، کاهش آشفتنگی، بهبود پایداری جریان و افزایش احتمال برخورد ذرات با دیواره‌ها برای بهبود بازده جداسازی بوده است. برای این منظور، از مدل عددی اعتبارسنجی شده استفاده شده و پارامترهایی نظیر بازده جداسازی، افت فشار و قطر برش ( $d_{50}$ ) در هر مرحله بررسی شده‌اند. در مرحله اول، استفاده از ورودی مارپیچی با زاویه ۳۶۰ درجه باعث افزایش هدایت جریان به دیواره‌ها شد و بازده جداسازی را به طور قابل توجهی افزایش داد. در مرحله دوم، گردابه‌یاب با سقف انحنا دار جایگزین نوع تخت شد و با یکنواخت سازی میدان جریان، افت فشار مرحله قبلی را کاهش داد. در ادامه، افزودن تثبیت کننده گردابه به بدنه موجب کاهش نوسانات و بهبود پایداری جریان مرکزی شد.



شکل ۱۰ نمایی از تغییرات مرحله‌ای سیکلون

Figure 10 the evolution in the geometry of cyclone

در نهایت، با اعمال طراحی مخروط هیبریدی معکوس پیچ خورده در بخش جمع‌آوری ذرات، بازده جداسازی ذرات ریز افزایش یافته و بازگشت ذرات جمع‌آوری شده به جریان اصلی کاهش یافت. در شکل (۱۰) نمایی از این ۴ تغییر آورده شده است. این اصلاحات به صورت



شکل ۱۲ نمای از سیکلون با گردابه‌یاب انحنا دار [۲۰]  
Figure ۱۲ View of a cyclone with a curved vortex-finder

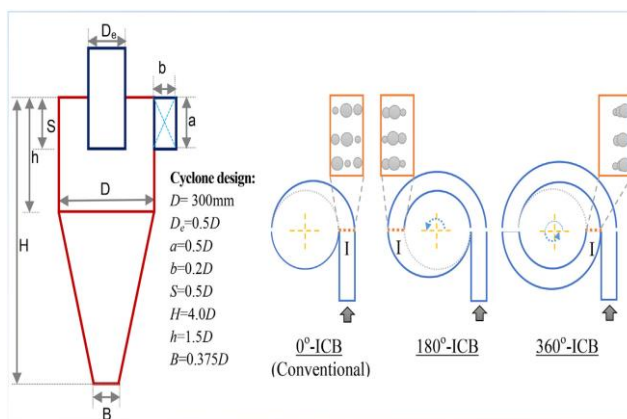
### ۳-۶ نتایج اعمال تغییرات در بدنه سیکلون

در مرحله سوم این پژوهش، تثبیت‌کننده گردابه میله‌ای به قطر ۰/۱ قطر اصلی سیکلون که به انتهای سیکلون متصل شده است، افزوده شد. هدف از این تغییر، کاهش نوسانات جریان در ناحیه مرکزی و بهبود پایداری میدان جریان بود. بر اساس یافته‌های دوان و همکاران [۲۶]، این تغییر طبق شکل (۱۳) عملکرد بهینه‌ای در تثبیت جریان و جلوگیری از افزایش افت انرژی دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزودن این تثبیت‌کننده، بازده جداسازی نسبت به مدل پایه ۱۳/۰۲٪ افزایش یافت، هرچند نسبت به تغییر قبلی تنها ۱/۱۵٪ بهبود داشت. قطر برش نیز از ۱/۵۱ به ۱/۳۹ میکرومتر کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش توانایی در جداسازی ذرات ریز بود. افت فشار نسبت به مدل پایه ۱۵/۴٪ افزایش یافت، اما همچنان در محدوده قابل قبول باقی ماند. به طور کلی، این تغییر با تثبیت ساختار جریان و بهبود یکنواختی توزیع فشار، نقش مؤثری در بهینه‌سازی عملکرد سیکلون ایفا کرد و مسیر را برای مرحله نهایی اصلاحات هموار ساخت. شکل (۱۵) و جدول (۶) تغییرات بازده جداسازی را نسبت به مدل پایه و تغییرات قبلی نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتایج تغییرات با افزودن میله تثبیت کننده

Table ۶ result for the adding vortex stabilizer

| Performance Parameter     | Base Case | Previous Value | New Value (Percentage Change (%)) | Percentage Change vs. Base Case (%) |
|---------------------------|-----------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Pressure drop (Pa)        | ۱۳۸۶,۳    | ۱۰۶۰,۱۰        | ۱۰۹۶,۲۹(+۱,۹۸٪)                   | +۱۰,۱۴٪                             |
| Separation efficiency (%) | ۷۶,۳۰     | ۸۰,۳۱۲۰        | ۸۶,۳(+۱,۱۰٪)                      | +۱۳,۰۲٪                             |
| Cut-off diameter (μm)     | ۱,۷۳      | ۱,۰۱           | ۱,۳۹(-۷,۹۴٪)                      | -۱۹,۶۰٪                             |



شکل ۱۱ نمای از سیکلون با ورودی مارپیچی یکپارچه [۱۳]  
Figure ۱۱ View of the cyclone with an integrated spiral inlet

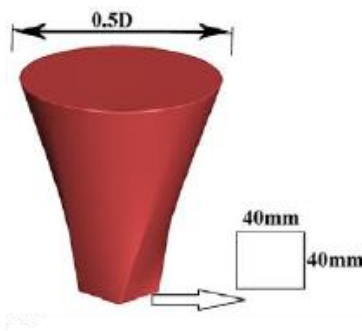
### ۲-۶ نتایج اعمال تغییرات در گردابه‌یاب سیکلون

در مرحله دوم پژوهش، طراحی انحنا دار برای گردابه‌یاب (ACR) به منظور کاهش افت فشار و بهبود پایداری جریان در کنار ورودی مارپیچی ۳۶۰ درجه بر روی سیکلون پایه استیرمند اعمال شد. این طراحی طبق شکل (۱۲) با الگوبرداری از مطالعه لی و همکاران [۲۰] انتخاب شد که در آن بهبود ۲۴/۱۶۶٪ بازده و کاهش ۲۸/۵۸٪ افت فشار گزارش شده بود. نتایج شبیه‌سازی حاضر نشان داد که بازده جداسازی نسبت به مدل پایه ۱۱/۷۲٪ افزایش یافت و قطر برش به ۱/۵۱ میکرومتر کاهش پیدا کرد، اما این بهبود نسبت به مرحله قبلی (ورودی مارپیچی) تفاوت قابل توجهی نداشت. در مقابل، افت فشار به میزان ۷/۴۹٪ نسبت به مدل ورودی مارپیچی کاهش یافت که به معنای جبران بخشی از افزایش افت فشار مرحله قبل بود. به طور کلی، این تغییر اگرچه بازده جداسازی را چندان افزایش نداد، اما با بهبود یکنواختی جریان و کاهش افت فشار، نقش مثبتی در بهینه‌سازی عملکرد سیکلون ایفا کرد و زمینه را برای تغییرات بعدی در بدنه فراهم ساخت. شکل (۱۵) و جدول (۵) تغییرات بازده جداسازی را نسبت به مدل پایه و تغییرات قبلی نشان می‌دهد.

جدول ۵ نتایج تغییرات در گردابه‌یاب سیکلون

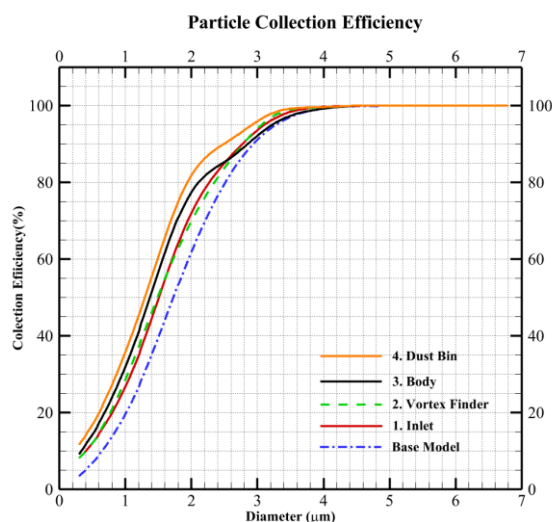
Table ۵ result for the change in the cyclone vortex finder section

| Performance Parameter     | Base Case | Previous Value | New Value (Percentage Change (%)) | Percentage Change vs. Base Case (%) |
|---------------------------|-----------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Pressure drop (Pa)        | ۱۳۸۶,۳    | ۱۶۹۱,۹         | ۱۰,۱۰(-۷,۴۹٪)                     | +۱۲,۹٪                              |
| Separation efficiency (%) | ۷۶,۳۰     | ۸۰,۱۰          | ۸۰,۳۱(+۰,۱۸٪)                     | +۱۱,۷۲٪                             |
| Cut-off diameter (μm)     | ۱,۷۳      | ۱,۰۲           | ۱,۰۱(-۰,۶۶٪)                      | -۱۲,۷۱٪                             |



شکل ۱۴ نمایی از مخروط جامد هیبریدی معکوس پیچ‌خورده (TIHSC) [۲۸]

Figure ۱۴ View of a twisted inverse hybrid solid cone (TIHSC)

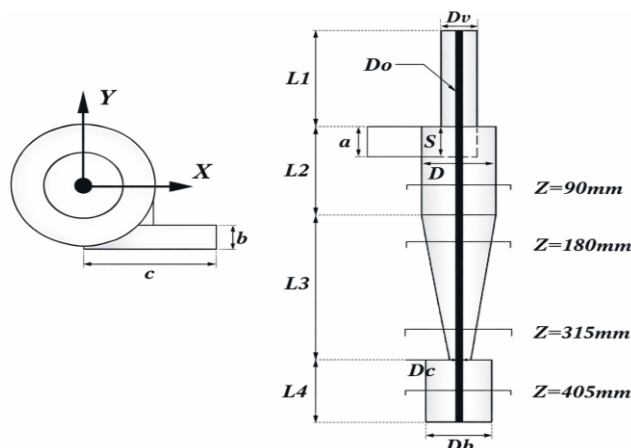


شکل ۱۵ نمودار مقایسه بازده جداسازی ذرات هر مرحله تجمیعی از تغییرات نسبت به مراحل پیش

Figure ۱۵ Comparison chart of the cumulative particle separation efficiency of each modification stage

## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر اعمال چهار تغییر هندسی مرحله به مرحله بر عملکرد سیکلون پایه استیرمند بررسی شده است. نتایج نشان داد که طراحی ورودی مارپیچی ۳۶۰ درجه بیشترین تأثیر را در افزایش بازده جداسازی (۱۱/۵۲٪) و کاهش قطر برش (۱۲/۱۴٪) داشته، هرچند افت فشار را نیز تا ۲۲/۰۴٪ افزایش داده است. در مرحله دوم، استفاده از گردابه یاب انحنادار موجب کاهش افت فشار نسبت به مرحله اول شد (۷/۴۹٪)، اما تأثیر چندانی بر قطر برش نداشت. در مرحله سوم، افزودن تثبیت کننده گردابه باعث بهبود پایداری جریان و کاهش قطر برش به ۱/۳۹ میکرومتر شد، با افزایش ۱۵/۱۴٪ در افت فشار نسبت به مدل پایه. در نهایت، طراحی مخروط هیبریدی معکوس پیچ‌خورده بازده جداسازی را تا ۱۶/۸۷٪ افزایش و قطر برش را به ۱/۳ میکرومتر کاهش داد، در حالی که افت فشار در محدوده قابل قبول باقی ماند. این نتایج



شکل ۱۳ نمایی از سیکلون با میله تثبیت کننده گردابه در ناحیه مرکزی [۲۶]

Figure ۱۳ View of the cyclone with a vortex-stabilizing rod in the central region

## ۴-۶ نتایج اعمال تغییرات در بخش جمع‌آوری ذرات سیکلون

در مرحله پایانی پژوهش، طراحی مخروط جامد هیبریدی معکوس پیچ‌خورده (TIHSC) طبق شکل (۱۴) در بخش جمع‌آوری ذرات سیکلون پایه استیرمند اعمال شد. این طراحی که پیش‌تر توسط دهداری‌نژاد و همکاران [۲۸] معرفی شده بود، با هدف کاهش بازگشت ذرات به جریان اصلی، کاهش افت فشار و افزایش بازده جداسازی به‌ویژه برای ذرات ریز انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که استفاده از TIHSC موجب افزایش بازده جداسازی به میزان ۱۶/۸۷٪ نسبت به مدل پایه و ۳/۴٪ نسبت به مرحله قبلی شد. قطر برش نیز به ۱/۳ میکرومتر کاهش یافت که نسبت به مدل پایه معادل ۲۴/۸۵٪ کاهش نشان می‌دهد و بیانگر بهبود چشمگیر در جداسازی ذرات کوچک است. همچنین، افت فشار نسبت به مرحله قبل ۱/۴۷٪ کاهش یافت، اگرچه همچنان نسبت به مدل پایه ۱۳/۴۵٪ افزایش داشت، اما در محدوده قابل قبول باقی ماند. این نتایج نشان داد که طراحی TIHSC علاوه بر حفظ مزایای مراحل پیشین، با تثبیت بیشتر جریان و افزایش جداسازی ذرات ریز، عملکرد کلی سیکلون را بهینه کرده و تکمیل کننده فرآیند بهینه‌سازی مرحله به مرحله در چهار بخش اصلی سیکلون بوده است. شکل (۱۵) و جدول (۷) تغییرات بازده جداسازی را نسبت به مدل پایه و تغییرات قبلی نشان می‌دهد.

جدول ۷ نتایج تغییرات با افزودن بخش مخروطی به محفظه جمع‌آوری ذرات

Table ۷ result for the adding a conic in the dust bin section

| Performance Parameter     | Base Case | Previous Value | New Value (Percentage Change (%)) | Percentage Change vs. Base Case (%) |
|---------------------------|-----------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Pressure drop (Pa)        | ۱۳۸۶.۳    | ۱۵۹۶.۲۹        | ۱۵۸۴.۸۴ (-۱.۴۷٪)                  | +۱۳.۴۵٪                             |
| Separation efficiency (%) | ۷۶.۳۵     | ۸۶.۳           | ۸۹.۲۴ (+۳.۴٪)                     | +۱۶.۸۷٪                             |
| Cut-off diameter (μm)     | ۱.۷۳      | ۱.۳۹           | ۱.۳ (-۶.۴۷٪)                      | -۲۴.۸۵٪                             |

نشان می‌دهد که ترکیب این تغییرات می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیکلون منجر شود، هرچند اثرات آن‌ها لزوماً خطی نبوده و در برخی موارد بیشتر موجب حفظ یا تقویت نتایج مراحل قبلی شده‌اند.

۷. Muschelknautz, E., ۱۹۷۲. Die berechnung von zyklonabscheidern für gase. *Chemie Ingenieur Technik*, 44(۱-۲), pp. ۶۳-۷۱.  
<https://doi.org/10.1002/cite.330440112>
۸. Reydon, R.F. and Gauvin, W.H., ۱۹۸۱. Theoretical and experimental studies of confined vortex flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 59(۱), pp. ۱۴-۲۳.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.540590102>
۹. Meißner, P. and Löffler, F., ۱۹۷۸. Zur berechnung des strömungsfeldes im zyklonabscheider. *Chemie Ingenieur Technik*, 50(۶), pp. ۴۷۱-۴۷۱.  
<https://doi.org/10.1002/cite.330500619>
۱۰. Iozia, D.L. and Leith, D., ۱۹۸۹. Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 10(۳), pp. ۴۹۱-۵۰۰.  
<https://doi.org/10.1080/02786828908909289>
۱۱. Iozia, D.L. and Leith, D., ۱۹۹۰. The logistic function and cyclone fractional efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 12(۳), pp. ۵۹۸-۶۰۶.  
<https://doi.org/10.1080/02786829008909373>
۱۲. Ramachandran, G., Leith, D., Dirgo, J. and Feldman, H., ۱۹۹۱. Cyclone optimization based on a new empirical model for pressure drop. *Aerosol Science and Technology*, 15(۲), pp. ۱۳۵-۱۴۸.  
<https://doi.org/10.1080/02786829108909520>
۱۳. Zhao, B., Wang, D. and Su, Y., ۲۰۱۹. Performance improvement of cyclone separator by integrated compact bends. *Powder Technology*, 353, pp. ۶۴-۷۱.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.004>
۱۴. Wasilewski, M. and Brar, L.S., ۲۰۱۹. Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 213, pp. ۱۹-۳۳.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.023>
۱۵. Brar, L.S., Rahmani, F. and Wasilewski, M., ۲۰۲۴. Performance analysis of multi-inlet cyclone separators considering different shapes and locations of the inlet ducts. *Advanced powder technology*, 35(۲), pp. ۱۰۴۳۲۵-۱۰۴۳۲۵.  
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104325>
۱۶. Feng, M., Gui, C., Zhou, Y. and Lei, Z., ۲۰۲۴. Numerical study on performance optimization

#### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

|               |                                           |
|---------------|-------------------------------------------|
| $p$           | فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )   |
| $u_i$         | مولفه‌های میدان سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ ) |
| $R_{ij}$      | تانسور تنش رینولدز                        |
| $Re_p$        | عدد رینولدز ذره                           |
| $C_D$         | ضریب پسا وارد بر ذره                      |
| $t$           | زمان (s)                                  |
| $\rho$        | چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )               |
| $\mathcal{G}$ | لزجت سینماتیکی                            |
| $k$           | انرژی جنبشی اغتشاشی                       |
| $\tau_{ij}$   | تنش رینولدز                               |
| $\delta_{ij}$ | ترم نرخ کرنش                              |

#### علائم یونانی

#### مراجع

۱. Hoffmann, A.C. and Stein, L.E., ۲۰۰۷. Gas cyclones and swirl tubes: principles, design, and operation.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74666-6>
۲. Shepherd, C.B. and Lapple, C.E., ۱۹۴۰. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors cyclone without intel vane. *Industrial & Engineering Chemistry*, 32(۹), pp. ۱۲۴۶-۱۲۴۸.  
<https://doi.org/10.1021/ie50369a042>
۳. Leith, D. and Mehta, D., ۱۹۷۳. Cyclone performance and design. *Atmospheric Environment*, 7(۵), pp. ۵۲۷-۵۴۹.  
[https://doi.org/10.1016/0046-6981\(73\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0046-6981(73)90066-1)
۴. Dietz, P.W., ۱۹۸۱. Collection efficiency of cyclone separators. *Aiche Journal*, 27(۶), pp. ۸۸۸-۸۹۲.  
<https://doi.org/10.1002/aic.690270603>
۵. Stairmand, C.J., ۱۹۴۹. Pressure drop in cyclone separators. *Engineering*, 168(۴۳۶۹), p. ۴۰۹.
۶. Barth, W., ۱۹۵۶. Berechnung und auslegung von zyklonabscheidern auf grund neuer untersuchungen. *Brennstoff-warme-kraft*, 8, pp. ۱-۹.

۲۵. Pandey, S. and Brar, L.S., ۲۰۲۲. On the performance of cyclone separators with different shapes of the conical section using CFD. *Powder Technology*, 407, p.۱۱۷۶۲۹.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117629>
۲۶. Duan, J., Gao, S., Hou, C., Wang, W., Zhang, P. and Li, C., ۲۰۲۰. Effect of cylinder vortex stabilizer on separator performance of the Stairmand cyclone. *Powder Technology*, 372, pp.۳۰۵–۳۱۶.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.031>
۲۷. Wasilewski, M. and Brar, L.S., ۲۰۲۳. Performance analysis of the cyclone separator with a novel clean air inlet installed on the roof surface. *Powder technology*, 428, pp.۱۱۸۸۴۹–۱۱۸۸۴۹.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118849>
۲۸. Dehdarinejad, E., Parvaz, F., Hosseini, S.H., Ahmadi, G. and Elsayed, K., ۲۰۲۳. Performance analysis of a gas cyclone with a dustbin inverted hybrid solid cone. *Aerosol Science and Technology*, 57(۹), pp.۹۱۱–۹۲۴.  
<https://doi.org/10.1080/02786826.2023.2217843>
۲۹. Elsayed, K., Parvaz, F., Hosseini, S.H. and Ahmadi, G., ۲۰۲۰. Influence of the dipleg and dustbin dimensions on performance of gas cyclones: An optimization study. *Separation and Purification Technology*, 239, pp.۱۱۶۵۵۳–۱۱۶۵۵۳.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116553>
۳۰. Parvaz, F., Hosseini, S.H., Elsayed, K. and Ahmadi, G., ۲۰۲۰. Influence of the dipleg shape on the performance of gas cyclones. *Separation and Purification Technology*, 233, pp.۱۱۶۰۰۰–۱۱۶۰۰۰.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116000>
۳۱. Sun, Y., Yang, G., Shen, Q., Li, S., Yang, X., Zhang, G. and Sheng, Z., ۲۰۲۴. Numerical analysis of cyclone separators with unique dipleg structures at different dipleg-to-dustbin ratios. *Powder Technology*, 443, pp.۱۱۹۹۰۴–۱۱۹۹۰۴.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119904>
۳۲. Parvaz, F., Hosseini, S.H., Elsayed, K. and Ahmadi, G., ۲۰۱۸. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 201, pp.۲۲۳–۲۳۷.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
- and flow mechanism of a new cyclone separator. *Green chemical engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.gce.2024.03.006>
۳۷. Fetuga, I.A., Olakoyejo, O.T., Abolarin, S.M., Adelaja, A.O., Ologunoba, S.O., Oluwatusin, O., Fetuata, O., Adewumi, O.O., Robinson, U.D. and Marcos, A., ۲۰۲۳. Eulerian–Lagrangian fluid dynamics study on the effects of inlet radial angle on the performance and flow pattern of multi-inlet cyclone separator. *Alexandria Engineering Journal*, 78, pp.۴۵۳–۴۶۸.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.07.058>
۳۸. Guo, M., Xue, H., Pang, J., Le, D.K., Sun, X. and Yoon, J.Y., ۲۰۲۲. Numerical investigation on the swirling vortical characteristics of a Stairmand cyclone separator with slotted vortex finder. *Powder Technology*, 416, pp.۱۱۸۲۳۶–۱۱۸۲۳۶.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118236>
۳۹. Li, W., Huang, Z. and Li, G., ۲۰۲۳. Improvement of the cyclone separator performance by the wedge-shaped roof: A multi-objective optimization study. *Chemical Engineering Science*, 268, p.۱۱۸۴۰۴.  
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118404>
۴۰. Li, W., Huang, Z., Li, G. and Ye, C., ۲۰۲۲. Effects of different cylinder roof structures on the vortex of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 296, pp.۱۲۱۳۷۰–۱۲۱۳۷۰.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121370>
۴۱. Kumar, V. and Jha, K., ۲۰۱۹. Multi-objective shape optimization of vortex finders in cyclone separators using response surface methodology and genetic algorithms. *Separation and Purification Technology*, 215, pp.۲۵–۳۱.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.083>
۴۲. Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X. and Wang, B., ۲۰۱۷. The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator. *Powder Technology*, 313, pp.۱۳۵–۱۴۴.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.066>
۴۳. Yang, H., Wang, N., Cao, Y., Meng, X. and Yao, L., ۲۰۲۲. Effects of helical fins on the performance of a cyclone separator: A numerical study. *Advanced Powder Technology*, 34(۱), pp.۱۰۳۹۲۹–۱۰۳۹۲۹.  
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103929>
۴۴. Zhou, F., Sun, G., Han, X., Zhang, Y. and Bi Wenqun, ۲۰۱۸. Experimental and CFD study on effects of spiral guide vanes on cyclone performance. 29(۱۲), pp.۳۳۹۴–۳۴۰۳.  
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.09.022>

۳۳. Hoekstra, A.J., ۲۰۰۰. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators.
۳۴. Jang, K., Lee, G.G. and Huh, K.Y., ۲۰۱۸. Evaluation of the turbulence models for gas flow and particle transport in URANS and LES of a cyclone separator. *Computers & Fluids*, 172, pp.۲۷۴-۲۸۳.  
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.۲۰۱۸.۰۴.۰۳۲>
۳۵. Soliman, M.M., Yasser El-shaer, Elsayed, K. and Ibrahim, M.A., ۲۰۲۰. Performance enhancement of gas cyclone with streamlined ports using CFD simulations. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(۱).  
<https://doi.org/10.1186/s13311-020-00700-8>
۳۶. Jefri Lim, A.D.L. and Abu Bakar, S.A., ۲۰۲۰. Effects of air vortex finder length and outlet diameter variations on oil palm loose fruit collector. *Journal of Engineering Research and Education (JERE)*, 16, pp.۷۶-۸۷.  
<https://doi.org/10.58910/jere.v16.۲۰۲۴.۱۵۱۴>
۳۷. Cen, Z.L., Zhao, J.G. and Shen, B.X., ۲۰۱۴. A comparative study of omega rsm and rng k-ε model for the numerical simulation of a hydrocyclone. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-international English Edition*, 33(۳), pp.۵۳-۶۱.  
<https://doi.org/10.3۰۴۹۲/ijcce.۲۰۱۴.۱۱۳۳۱>
۳۸. Corrêa, R.G., Andrade, J.R. and José, F., ۲۰۲۳. Improving separation prediction of cyclone separators with a hybrid URANS-LES turbulence model. *Powders*, 2(۳), pp.۶۰۷-۶۲۳.  
<https://doi.org/10.3۳۹۰/powders۲۰۲۰.۰۳۸>
۳۹. Misiulia, D., Antonyuk, S., Andersson, A.G. and Lundström, T.S., ۲۰۲۰. High-efficiency industrial cyclone separator: A CFD study. *Powder Technology*, 364, pp.۹۴۳-۹۵۳.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.۲۰۱۹.۱۰.۰۶۴>
۴۰. Brar, L.S., Sharma, R.P. and Elsayed, K., ۲۰۱۰. The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone. *Powder Technology*, 286, pp.۶۶۸-۶۷۷.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.۲۰۱۰.۰۹.۰۰۳>
۴۱. Zhao, B., ۲۰۰۰. Development of a new method for evaluating cyclone efficiency. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(۴), pp.۴۴۷-۴۵۱.  
<https://doi.org/10.1016/j.cep.۲۰۰۴.۰۶.۰۰۷>