

بهینه سازی عددی ابعاد سیکلون جداساز ذرات با استفاده از روش تاگوچی

قدرت قصابی^{۱*}

Ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

امیر حسین شریفی^۲

محمدرضا مرداسی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۴

چکیده

زمینه و هدف: جداسازی ذرات از جریان سیال به دلیل حفظ پاکیزگی محیط زیست در صنعت و تحقیقات مورد توجه محققان بوده است. یکی از پرکاربردترین تجهیزات جداساز ذرات، سیکلون^۲ می باشد. سیکلون تجهیزاتی است که بر مبنای اثر چگالی ذرات و نیروی گریز از مرکز ذرات را از جریان سیال جدا می کند. هدف پژوهش حاضر این است مشخصه های هندسی سیکلون به منظور افزایش کارایی سیکلون و کاهش افت فشار بهینه شود. تعداد پارامترهای هندسی در سیکلون بسیار زیاد است که بررسی همه حالات به صورت عددی و یا آزمایشگاهی زمان زیادی را لازم خواهد داشت.

روش بررسی: بدین منظور ابتدا با استفاده از روش تاگوچی تعداد حالات مورد بررسی، کاهش داده شد. سپس با استفاده از نرم افزار ANSYS FLUENT 16 شبیه سازی عددی صورت گرفت و کارایی و افت فشار سیکلون محاسبه گردید و سپس با استفاده از نرم افزار MINITAB و روش تاگوچی، بهینه سازی صورت گرفت و نحوه تاثیر متغیرها بر افزایش کارایی جداسازی و کاهش افت فشار بررسی شد.

یافته ها: نتایج نشان می دهد تاثیر افزایش ارتفاع استوانه سیکلون، بر کاهش کارایی ۷۵٪ و بر کاهش افت فشار ۵٪ است. همچنین مشاهده شد تاثیر افزایش سطح مقطع ورودی، برافزایش کارایی ۷۵٪ و بر افزایش افت فشار ۲۰ درصد می باشد و مشاهده گردید با افزایش ارتفاع ردیاب گرداب، کارایی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. و افت فشار ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

بحث و نتیجه گیری: مقایسه نتایج نشان می دهد قطر خروجی سیکلون موثرترین پارامتر جهت افزایش کارایی جداسازی ذرات و کاهش افت فشار است. مشاهده شد ارتفاع بخش مخروطی کمترین تاثیر را بر کارایی جداسازی ذرات و ارتفاع ردیاب گردابه کمترین تاثیر را بر افت فشار سیکلون دارد.

واژه های کلیدی: کارایی جداسازی، افت فشار، نسبت سیگنال به نویز، جریان آشفته.

۱- استادیار، دانشگاه بزرگمهر قائنات، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک. * (مسئول مکاتبات)

۲- کارشناسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک.

Numerical Optimization of Cyclone Separator Geometry Using Taguchi Method

Ghodrat Ghassabi ^{1*}

Ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

Amirhossein Sharifi ²

Mohammadreza Merdasi ²

Date of Acceptance: October 4, 2024

Date of Submission: September 5, 2023

Abstract

Background and objective: The separation of particles from fluid flow has been interested for researchers due to the preservation of environmental cleanliness. One of the most commonly used particle separation equipment is a cyclone. A cyclone is a device that separates particles from the fluid flow based on their density effect and centrifugal force. The aim of this research is to optimize the geometric characteristics of the cyclone in order to increase its efficiency and reduce pressure drop. There are numerous geometric parameters in a cyclone, and examining all cases numerically or experimentally would require a significant amount of time.

Material and methodology: for this purpose, the number of case studies was reduced using the Taguchi method. Then, numerical simulation was performed using ANSYS Fluent 16 software, and the efficiency and pressure drop of the cyclone were calculated. Next, optimization was carried out using the Taguchi method and Minitab software, and the impact of variables on increasing separation efficiency and reducing pressure drop was examined.

Findings: The impact of increasing the height of the cyclone cylinder is a 75% reduction in efficiency and a 5% reduction in pressure drop. It was also observed that the effect of increasing the inlet cross-sectional area is a 75% increase in efficiency and a 20% increase in pressure drop. Also, with an increase in the height of the vortex finder, efficiency initially increases and then decreases, while pressure drop initially decreases and then increases.

Discussion and conclusion: Comparison of the results shows that the cyclone outlet diameter is the most effective parameter for increasing particle separation efficiency and reducing pressure drop. Also, result show that the height of the conical section has the least impact on particle separation efficiency, and the height of the vortex finder has the least impact on cyclone pressure drop.

Keywords: Particle separation efficiency, pressure drop, Signal to noise ratio, Turbulent flow

1- Assistance professor of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran.

*(Corresponding Author)

2- Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran.

مقدمه

اغلب اوقات جریان سیال در صنایع مختلف همراه با ذراتی است که می‌تواند عوارض زیادی برای محیط زیست به همراه داشته باشد. مطالعه و تحقیق درمورد جداسازی ذرات از یک جریان سیال به ویژه ذرات جامد از جریان گاز، مبنای مهمی در طراحی و فرآیندهای صنعتی و زیست محیطی به شمار می‌رود. یکی از عمده‌ترین وسایلی که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد سیکلون‌ها می‌باشد؛ سیکلون‌ها بر اساس نیروی گریز از مرکز عمل جداسازی را انجام می‌دهند و با وجود ساختمان ساده، از لحاظ شکل هندسی پیچیده بوده و اهمیت مطالعه عملکرد سیکلون‌ها و بررسی آن در جهت افزایش کارایی جداسازی و کاهش افت فشار حائز اهمیت می‌باشد و توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است.

گیمبون (۱) اثرات ابعاد هندسی بخش مخروطی را بر بازده و افت فشار سیکلون به صورت تجربی مورد آزمایش قرار داد، در آزمایش وی کاهش اندازه بخش مخروطی با افزایش کارایی همراه بود. لی و همکارانش (۲) به مطالعه استفاده از سیکلون به صورت تجربی و آزمایشگاهی پرداختند و وابستگی کارایی جمع‌آوری ذرات در طراحی را بررسی کردند. فینگ لیو و همکارانش (۳) به مقایسه تاثیرات سیکلون موازی پرداختند و مشاهده کردند برای ذرات بزرگتر کارایی سیکلون‌های موازی بیشتر است و برای سرعت ورودی یکسان افت فشار در سیکلون‌های موازی در حدود $16/8\%$ بیشتر از یک سیکلون است. پرانس بالتراس و همکارانش (۴) ساختار هندسی سیکلون‌های چند کاناله را جهت افزایش کارایی بهینه‌سازی کردند آن‌ها سرعت جریان هوا را بین ۱۸-۱۲ متر بر ثانیه در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کارایی با افزایش قطر برای دو ماده گرانبه و چوب به دلیل افزایش جرم افزایش می‌یابد. صفی‌خانی و همکارانش (۵) مقاله‌ای در مورد کارایی دستگاه جداساز سیکلون و طراحی آن ارائه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش فاصله‌ی بین ردیاب گردابه و محدودکننده گردابه، افزایش طول ردیاب گردابه و همچنین افزایش قطر محدود کننده گردابه افت فشار کاهش پیدا می‌کند. هبگ و

همکارانش (۶) با استفاده از شبیه سازی عددی سیکلون‌های دارای ذرات با قطر ۲۹ تا ۵۲ میلیمتر و نرخ جریان از ۶۰ تا ۵۴۰ لیتر بر دقیقه را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده کردند که روش عددی بر پیش‌بینی افت فشار تاثیر دارد و در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی افت فشار بیشتری را پیش بینی می‌نماید. شیلین چن و همکارانش (۷) ساختار و قاعده‌ی کار جداسازهای جدیدی را معرفی کردند و مطالعاتی در زمینه‌ی جریان آن‌ها و عملکرد جداسازی‌های آن‌ها انجام دادند. آن‌ها یک جداکننده سیکلونی دینامیکی از نوع جریان برگشتی را نشان دادند. نحوه عملکرد این سیکلون‌ها به گونه‌ای است که گردوغبار از طریق ورودی وارد می‌شود و سپس به طرف پروانه در حال چرخش رفته و شتاب می‌گیرد که به دلیل سرعت بالای پروانه، ذرات به دیواره پرتاب شده و گاز تمیز به بخش مرکزی می‌رود و در نهایت از لوله اغزوز خارج می‌شود و سپس بخشی از گاز به لوله برگشتی برای جدایی ثانویه منتقل می‌شود. این سیکلون‌ها دارای افت فشار کم در حدود 10% در مقایسه با جداکننده‌های بدون لوله برگشتی می‌باشد. از نتایج آنها مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جریان، تاثیر مستقیم بر کارایی دارد. هانگ و همکارانش (۸) در سال ۲۰۱۶ شبیه‌سازی عددی برای تخمین اثر آرام کننده جریان روی افت فشار سیکلون‌ها انجام دادند، استفاده از آرام کننده‌ها، سبب افزایش افت فشار در میان سیکلون‌ها و سبب کاهش سرعت مماسی گاز می‌شود. مشاهده می‌شود که وجود آرام کننده جریان، سبب کاهش کارایی می‌شود. صفی‌خانی (۹) مطالعاتی در زمینه بهینه‌سازی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک یک سیکلون جدید جدا کننده انجام داد تا سیکلون با بیشترین کارایی و کمترین افت فشار بدست آید. میژولای و همکارانش (۱۰) اثر زاویه‌ی دهانه ورودی بر کارایی جداسازی یک سیکلون با دهانه‌ی مارپیچی-پوششی را مورد بررسی قرار دادند که برای شبیه‌سازی‌های جریان‌های بزرگ در پنج دهانه‌ی مختلف (۷، ۱۱، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه) استفاده کردند و سپس مشاهده کردند افزایش زاویه‌ی ورودی سبب کاهش

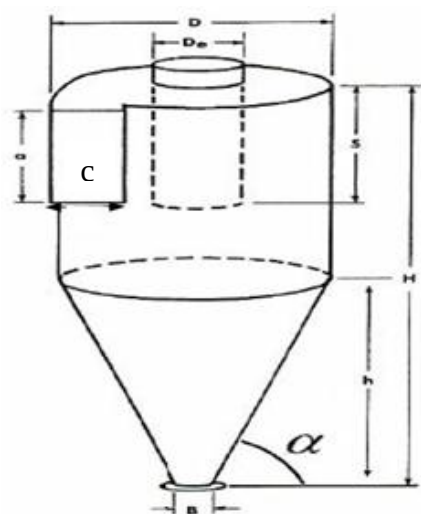
سیکلون در حالت های منتخب روش تاگوچی توسط نرم افزار انسیس فلونت شبیه سازی شده و کارایی و افت فشار محاسبه می شود و الگوریتم تاگوچی رفتار متغیرهای هندسی سیکلون را بر کاهش افت فشار و افزایش کارایی تعیین می نماید.

۲- روش حل مسئله

سیکلون یک تجهیز جداساز ذرات می باشد که از نیروی اینرسی ذرات و اختلاف چگالی جهت جداسازی ذرات استفاده می کند. در شکل ۱، نمونه ای از یک سیکلون نمایش داده شده است. ذرات با جریان هوا مطابق شکل ۱، از ورودی جریان به طور مماسی به سیکلون وارد می شود و یک مسیر چرخشی را در سیکلون طی می کند و با استفاده از نیروی گریز از مرکز، یک ناحیه خلاء نسبی در بخش مرکزی آن ایجاد می شود، سیال تمیز توسط این ناحیه مکش توسط ردیاب گردابه و خروجی سیکلون خارج شده و ذرات به دلیل نیروی گریز از مرکز، از ناحیه مرکزی و خلاء نسبی فاصله گرفته و به دلیل نیروی ثقل، در قسمت پایینی سیکلون جمع آوری می شود. در شکل ۲، هندسه سیکلون و ابعاد آن نمایش داده شده است. هوا با سرعت ۱۸/۵ متر بر ثانیه و با دبی ۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه وارد سیکلون می شود. ذرات همراه با جریان هوا از نوع و جنس چوب بوده و قطر ذرات بین ۱ تا ۵۰ میکرومتر، متغیر می باشد. قطر سیکلون نیز ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

کارایی جداسازی سیکلون می شود. ژنگ و همکاران (۱۱) اثر نسبت قطر و ارتفاع ردیاب گردابه سیکلون را بر کارایی جداسازی و افت فشار بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می دهد با افزایش قطر ردیاب گردابه، کارایی جداسازی افزایش و افت فشار کاهش می یابد. لی ونگ و همکاران (۱۲) اثر قطر ذرات را بر کارایی جداسازی یک سیکلون به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد ماکزیمم کارایی برابر ۹۹/۴۸٪ برای ذرات کوچکتر از ۱۳ میکرون است. عبدی و سعیدی (۱۳) با استفاده از شبیه سازی عددی اثر هندسه ردیاب گردابه را در یک سیکلون جداساز مربعی بر کارایی جداسازی و افت فشار بررسی نمودند. هندسه استوانه ای و مربعی برای ردیاب گردابه بررسی شد. نتایج آنها نشان می دهد ردیاب استوانه ای کارایی جداسازی و افت فشار را افزایش می دهد. همچنین مشاهده کردند با نصف شدن قطر هیدرولیکی ردیاب گردابه ای، افت فشار ده برابر و کارایی جداسازی دو برابر شده است.

در این مقاله هدف این است بهینه سازی ابعاد سیکلون به منظور افزایش کارایی و کاهش افت فشار بر مبنای روش تاگوچی انجام گیرد. تمایز این روش نسبت به روش های دیگر کاهش حجم محاسبات و کاهش تعداد حالت های لازم برای بهینه سازی می باشد که در مطالعات قبلی جهت بهینه سازی سیکلون مورد استفاده قرار نگرفته است. برای این منظور،

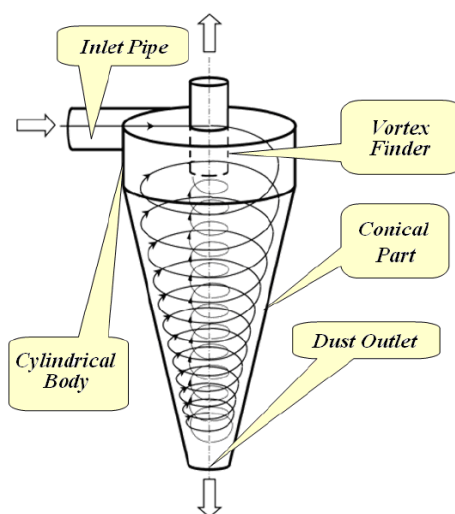


شکل ۲- هندسه و ابعاد سیکلون

Figure 2. Geometry and Dimensions of cyclone

$$\eta = \frac{\sum \text{Trapped particles}}{\sum \text{total particles}} \quad (1)$$

بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی در شکل ۳ صورت گرفته است. در شکل ۳ سرعت محوری بر حسب شعاع برای چهار شبکه مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود با افزایش تعداد شبکه سیکلون، انطباق سرعت محوری خصوصاً در نزدیکی دیواره ها افزایش می یابد. و در نتیجه برای کاهش محاسبات و ایجاد نتایج دارای دقت مناسب، تعداد ۶۵۲۴۸ برای شبکه بندی سیکلون مناسب می باشد. در شکل ۴ نمونه ای از شبکه بندی سیکلون همراه با شرایط مرزی نشان داده شده است. شرط ورودی سرعت معلوم، شرط خروجی فشار معلوم در نظر گرفته می شود.

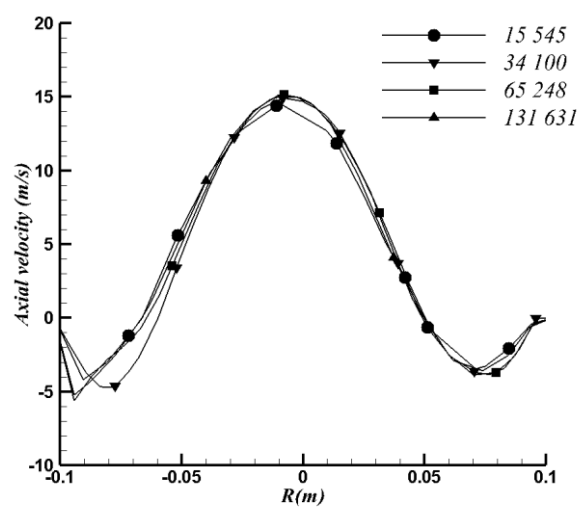


شکل ۱- معرفی بخش های سیکلون و رفتار جریان سیال

Figure 1. Introduction to Cyclone Sections and Fluid Flow Behavior.

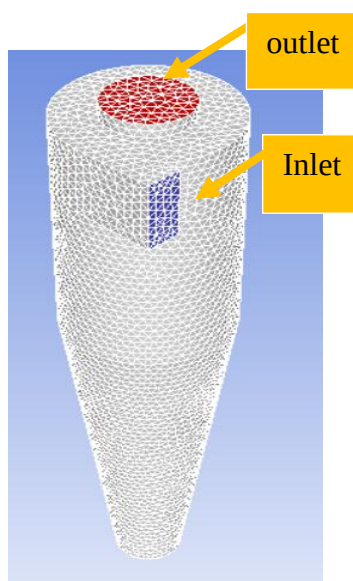
برای شبیه سازی از ANSYS FLUENT 16 استفاده شده است، الگوریتم سیمپل جهت گسسته سازی جملات فشار و ممنوم استفاده شده است. معیار همگرایی معادلات 10^{-3} لحاظ شده است. جهت مدل سازی آشفتگی از مدل k-ε استاندارد استفاده شده است که این مدل بر روی عملکردهایی که بر روی انرژی جنبشی آشفتگی اثر می گذارد متمرکز شده است. نیروهای وارد بر ذرات شامل نیروی درگ و نیروی ثقل می باشد و ذرات بصورت کروی فرض می شود.

جهت محاسبه کارایی جداسازی سیکلون (η) از رابطه زیر استفاده شده است که نشان دهنده تعداد ذرات به دام افتاده در سیکلون به کل ذرات ورودی به سیکلون است:



شکل ۳- سرعت محوری برای چهار شبکه‌ی محاسباتی

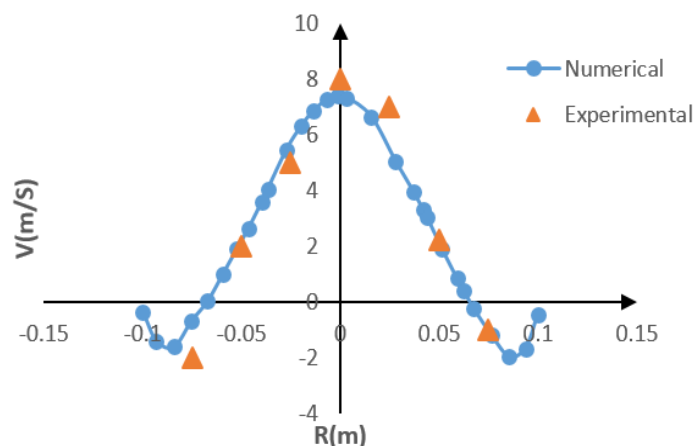
Figure 3. Axial velocity for four number of grids



شکل ۴- شبکه بندی و شرایط مرزی

Figure 4. Computational mesh and boundary conditions

در شکل ۵، برای اعتبارسنجی، نتایج حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع ۱۶ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود نتایج عددی انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۵- مقایسه سرعت محوری حاصل از نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع (۱۶)

Figure 5. Comparison of the axial velocity for numerical and experimental results (16)

است (۱۶). مطابق جدول ۱، در سطح اول مقادیر متغیرها بر مبنای افزایش کارایی جداسازی، سطح دوم شرایط استاندارد برای سیکلون و سطح سوم، بر مبنای کاهش افت فشار لحاظ شده است.

با توجه به شکل ۲، متغیرهای هندسی زیادی در عملکرد سیکلون موثر است. به منظور کاهش متغیرهای هندسی سیکلون و از بین بردن وابستگی متغیرها به هم، تمام متغیرها به هفت متغیر مستقل بی بعد تبدیل می‌شوند. متغیرها در سه سطح در جدول ۱ نشان داده شده

جدول ۱- متغیرهای بی بعد شده

Table 1. Non dimensional variables

Variable	High efficiency	Standard	Low pressure
a / D	۰/۴۴	۰/۵	۰/۸
c / D	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۵
D_e / D	۰/۴	۰/۵	۰/۷۵
$(H-h) / D$	۱/۴	۱/۷۵	۱/۷
H / D	۲/۵	۲	۲
S / D	۰/۵	۰/۶	۰/۸۵
B / D	۰/۴	۰/۴	۰/۴

MINITAB و به روش Taguchi تعداد حالت ها به 3^3 کاهش داده شد. روش تاگوچی یک ترکیب بهینه ای از تقابل متعامد بین متغیرهای مستقل ایجاد می‌کند که با حداقل تعداد حالت های مورد بررسی، متغیر وابسته بیشترین میزان حساسیت را به تغییرات متغیرهای مستقل دارا باشد. روش

متغیر B در هر سه حالت یکسان است و می‌تواند در بررسی ها ثابت لحاظ شود. در نتیجه با توجه به جدول ۲، تعداد حالات ممکن جهت شبیه سازی سیکلون، 3^6 می باشد که شبیه سازی و بررسی این تعداد حالت از سیکلون با توجه به درنظر گرفتن زمان لازم منطقی نمی باشد. لذا به کمک نرم افزار

تاگوچی از آرایه های متعامد برای سازماندهی متغیرهای مستقل و سطوح تغییرات آنها استفاده می کند. این روش به جای انجام تمام حالت های ممکن به مانند روش طراحی فاکتوریل، ترکیبات دوتایی از متغیرهای مستقل را در نظر می گیرد که سبب می شود با حداقل تعداد حالت های ممکن، اطلاعات ضروری جمع آوری گردد و مشخص می کند کدام متغیر مستقل بیشترین اثر را بر متغیر وابسته دارد بنابراین سبب کاهش زمان لازم محاسبات می گردد.

گام اول در روش تاگوچی، انتخاب سطوح متغیرهای مستقل یعنی سطح عامل هاست که در جدول ۲ نشان داده شده است. با استفاده از آرایه های متقارن، گام دوم شامل تعیین تعامل بین سطوح متغیرات مستقل است. در این آرایه ها، ستون ها به یکدیگر عمود هستند. این بدان معناست که تمام ترکیبات سطح متغیر برای هر جفت ستون وجود دارد. آرایه های متقارن موجود شامل L_9 و L_{27} هستند. قبل از انتخاب آرایه متقارن، باید حداقل تعداد آزمایش ها را به شکل زیر تعیین کرد (۱۷)

$$N_{\text{Taguchi}} = 1 + \sum_{i=1}^p (L_i - 1) \quad (2)$$

در این رابطه، P نشان دهنده تعداد متغیرهای مستقل و L_i نشان دهنده تعداد سطح هر متغیر مستقل است. در این پژوهش، شش متغیر در سه سطح تقسیم شده اند که در جدول ۲ نشان داده شده است. بنابراین، حداقل تعداد آزمایش ها بر اساس فرمول (۹) برابر با ۱۳ است. بنابراین، می توان آرایه های متقارن L_{27} را انتخاب کرد. جدول ۳ ساختار این آرایه را نشان می دهد. تعداد کل موارد ممکن براساس مقادیر متغیرها برابر با ۴ حالت است. الگوریتم بهینه سازی تاگوچی تعداد مورد نیاز برای پژوهش را به ۲۷ کاهش می دهد. بنابراین، روش تاگوچی با استفاده از نرم افزار Minitab برای شبیه سازی ۲۷ حالت طبق جدول ۳ استفاده شده و سطح بهینه متغیرات تعیین شده است.

در روش تاگوچی برای تجزیه و تحلیل داده ها، از معیار عملکرد آماری به نام نسبت سیگنال به نویز استفاده می شود. نسبت سیگنال به نویز یک معیار عملکرد است که سطوح متغیر

کنترلی را به گونه ای انتخاب می کند که متغیرهای نویزی با بهترین روش مقابله شوند. نسبت سیگنال به نویز بستگی به معیار ویژگی کیفیت دارد که قرار است بهینه شود. اگرچه معیار نسبت سیگنال به نویز بسیار زیاد است، اما سه معیار رایج تر در نظر گرفته می شود. این معیارها در موارد زیر استفاده می شوند:

۱- ویژگی با کیفیت بالاتر بهتر است.

۲- ویژگی با کیفیت پایین تر بهتر است.

۳- ویژگی با کیفیت اسمی بهتر است.

در این پژوهش، برای تعیین سطوح بهینه، معیار "کمتر بهتر" برای افت فشار و بیشتر بهتر برای کارایی جداسازی استفاده شده است زیرا هدف کاهش افت فشار و افزایش کارایی جداسازی است. برای این دو معیار، به ترتیب روابط زیر جهت محاسبه نسبت سیگنال به نویز در موارد N تکرار، لازم است

(۱۸)

$$\eta_{L.B} = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m^2 \right) \quad (3)$$

$$\eta_{H.B} = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{1}{y_m^2} \right) \quad (4)$$

یافته ها

در این بخش برای تحلیل نتایج حاصل از روش تاگوچی و پیدا کردن اهمیت نسبی متغیرها، بر روی هر کدام از خروجی ها از یک روش آماری به نام آنالیز واریانس استفاده می شود. در جدول آنالیز واریانس، آزمون F نشان دهنده تأثیرگذاری یا عدم تأثیرگذاری متغیرهای مورد آزمایش در سطح اطمینان مورد نظر می باشد. پس از کامل شدن جدول آنالیز واریانس، از جدول F value برای تعیین تعداد فاکتورهای موثر استفاده می شود. مقدار بزرگتر F نشان می دهد که تغییر متغیر مستقل اثر بیشتری بر روی ویژگی های عملکردی متغیر وابسته دارد.

در جدول ۲، مقادیر مقادیر F برای متغیرهای مختلف بر مبنای معیار بزرگتر بهتر برای کارایی جداسازی و معیار کوچکتر بهتر برای افت فشار بیان شده است. مطابق نتایج جدول ۴، مشاهده می شود نسبت قطر خروجی سیکلون به قطر بخش استوانه ای (D_e/D)، دارای بیشترین مقدار F برای هر دو معیار است در نتیجه موثرترین متغیر برای افزایش کارایی جداسازی ذرات و

کارایی جداسازی ذرات دارد. زیرا افزایش و یا کاهش ارتفاع مقطع ورودی، سبب تاثیر بر دبی جریان و در نتیجه تاثیر بر میزان نیروی گریز از مرکز می شود. از طرفی ملاحظه می شود ارتفاع بخش مخروطی کمترین تاثیر را بر کارایی جداسازی ذرات سیکلون دارد. که می تواند به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز در بخش مخروطی باشد و ملاحظه می شود ارتفاع ردیاب گردابه کمترین تاثیر را در افت فشار سیکلون دارد.

کاهش افت فشار است زیرا افزایش و یا کاهش قطر خروجی تاثیر شدید بر میزان مکش و ناحیه تحت تاثیر مکش در سیکلون دارد. سپس ارتفاع بخش استوانه ای سیکلون ($H-h/D$) بیشترین تاثیر را بر کارایی جداسازی ذرات دارد. زیرا افزایش و یا کاهش ارتفاع بخش استوانه ای سیکلون، طول مسیر دارای گرادیان فشار را تحت تاثیر قرار می دهد و میزان فرصت سیکلون برای جداسازی ذرات را تحت تاثیر قرار می دهد. سپس ارتفاع مقطع ورودی a/D بیشترین تاثیر را بر

جدول ۲- آنالیز واریانس نسبت سیگنال به نویز برای کارایی جداسازی ذرات و افت فشار سیکلون

Table 2. ANOVA of S/N ratios for particles separation efficiency and pressure drop

متغیر	F-LB	F-HB
a/D	۳۸/۹۶	۰/۷۸
c/D	۸/۹۳	۰/۸
De/D	۴۷/۰۹	۰/۹۶
(H-h)/D	۴/۵۶	۰/۹۳
H/D	۲/۲۴	۰/۴
S/D	۰/۳۹	۰/۸۹

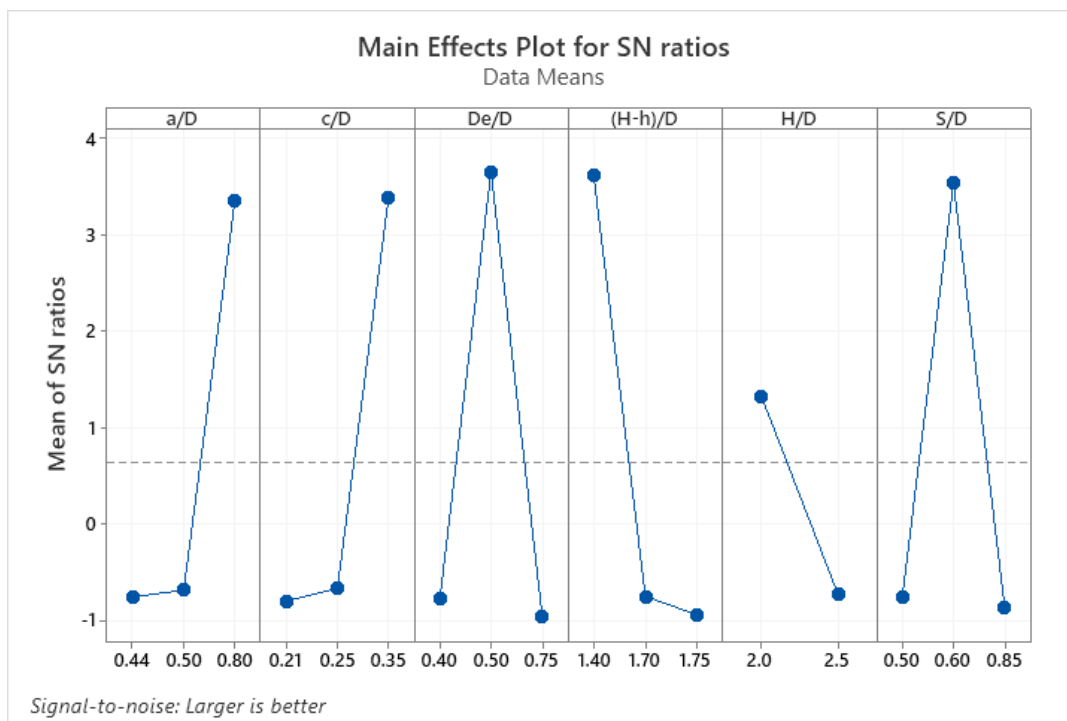
ابتدا به دلیل جلوگیری از خروج سریع ذرات بلافاصله بعد از ورود به سیکلون کارایی جداسازی افزایش می یابد اما افزایش بیشتر ارتفاع ردیاب گردابه سبب افزایش میزان مکش و در نتیجه سبب خروج بیشتر ذرات می شود.

در شکل ۷، مقادیر سیگنال به نویز بر مبنای معیار کوچکتر بهتر برای میزان افت فشار سیکلون نشان داده شده است. مشاهده می شود با افزایش سطح مقطع ورودی ($a/D, c/D$) به دلیل افزایش جریان و سرعت سیال، افت فشار افزایش یافته است. در مورد قطر خروجی (De/D)، افزایش قطر خروجی سبب کاهش فشار مکش و کاهش افت فشار می شود. برای ارتفاع بخش استوانه ای، مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بخش استوانه ای سیکلون ($H-h/D$)، به دلیل افزایش حجم جریان سیال، سرعت جریان سیال و در نتیجه افت فشار کاهش می یابد. این نتیجه برای ارتفاع کل سیکلون نیز مشابه است (H/D). در مورد ارتفاع ردیاب گردابه (S/D) نیز مشاهده

در شکل ۶، مقادیر سیگنال به نویز بر مبنای معیار بزرگتر بهتر برای کارایی جداسازی نشان داده شده است. مشاهده می شود با افزایش سطح مقطع ورودی ($a/D, c/D$) به دلیل افزایش نیروی گریز از مرکز، کارایی جداسازی افزایش یافته است. در مورد قطر خروجی (De/D)، افزایش قطر خروجی تا حدی ابتدا به دلیل کاهش فشار مکش سبب جلوگیری از فرار ذرات می شود اما افزایش بیشتر قطر خروجی محدوده فشار منفی را افزایش می دهد در نتیجه ذرات بیشتری همراه با جریان هوا فرار خواهند کرد. برای ارتفاع بخش استوانه ای ($H-h/D$)، مشاهده می شود با افزایش ارتفاع بخش استوانه ای سیکلون، به دلیل افزایش مدت زمان ماندگاری ذرات، امکان فرار ذرات افزایش می یابد و در نتیجه کارایی جداسازی کاهش می یابد. این نتیجه برای ارتفاع کل سیکلون نیز مشابه است (H/D). در مورد ارتفاع ردیاب گردابه (S/D) نیز مشاهده می شود شرایط بهینه ای وجود دارد به عبارتی با افزایش ارتفاع ردیاب گردابه،

بیشتر ارتفاع ردیاب گردابه سبب افزایش مدت ماندگاری سیال و در نتیجه افزایش افت فشار می‌گردد.

می‌شود مشابه حالت قبل، شرایط بهینه ای وجود دارد به عبارتی با افزایش ارتفاع ردیاب گردابه، به دلیل جلوگیری از تغییرات ناگهانی فشار، افت فشار کاهش می‌یابد اما افزایش



شکل ۶ - مقادیر سیگنال به نویز بر مبنای معیار بزرگتر بهتر برای کارایی جداسازی

Figure.6. S/N ratios for each factor for the higher the better criterion for separation efficiency



شکل ۷ - مقادیر سیگنال به نویز بر مبنای معیار کمتر بهتر برای افت فشار

Figure 7. S/N ratios for each factor for the lower the better criterion for pressure drop

- of a novel swirl cyclone scrubber-(1) Experimental,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 39, pp. 1079–1088.
3. Liu, F., Chen, J., Zhang, A., Wang, X., Dong, T., 2014. “Performance and flow behavior of four identical parallel cyclones,” *Sep. Purif. Technol.*, Vol. 134, pp. 147–157.
 4. Baltrenas, P., Pranskevicius, M., Venslovas, A., 2015. “Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone Cleaning Efficiency,” *Energy Procedia*, Vol. 72, pp. 188–195.
 5. Safikhani, H., Mehrabian, P., 2016. “Numerical study of flow field in new cyclone separators,” *Adv. POWDER Technol.*, Vol. 29, pp. 611–622.
 6. Haig, C. W., Hursthouse, A., Sykes, D., Mcilwain, S., 2016. “The rapid development of small scale cyclones — numerical modelling versus empirical models,” *Appl. Math. Model.*.
 7. Chen, S., Liu, P., Gong, J., 2017. “Performance study of back flow type dynamic cyclone separator for coalbed methane,” *Powder Technol.*, Vol. 305, pp. 56–62.
 8. Huang, A., Maeda, N., Shibata, D., Fukasawa, T., Yoshida, H., Kuo, H., 2016. “Influence of a laminarizer at the inlet on the classification performance of a cyclone separator,” *Sep. Purif. Technol.*
 9. Safikhani, H., 2016. “Modeling and multi-objective Pareto optimization of new cyclone separators using CFD, ANNs and NSGA II algorithm,” *Adv. Powder Technol.*
 10. Misiulia, D., Andersson, A. G., Lundström, T. S., 2017. “Effects of the inlet angle on the collection efficiency of a cyclone with helical-roof

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش مشخصه های هندسی سیکلون به منظور بهینه سازی و افزایش کارایی جداسازی سیکلون و کاهش افت فشار به صورت عددی با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۶ شبیه سازی عددی گردید. در این بررسی جهت بهینه سازی و کاهش حالت های مورد بررسی از روش تاگوچی استفاده گردید. نتایج این بررسی نشان می دهد :

۱. قطر خروجی سیکلون موثرترین پارامتر جهت افزایش کارایی جداسازی ذرات و کاهش افت فشار است.
۲. ارتفاع بخش مخروطی کمترین تاثیر را بر کارایی جداسازی ذرات و ارتفاع ردیاب گردابه کمترین تاثیر را بر افت فشار سیکلون دارد.
۳. با افزایش ارتفاع استوانه سیکلون (H-h) کارایی و افت فشار نیز کاهش می یابد.
۴. با افزایش سطح مقطع ورودی، کارایی و افت فشار افزایش می یابد.
۵. با افزایش ارتفاع دریاب گردابه (S)، کارایی جداسازی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. و افت فشار ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

تقدیر و تشکر

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۳۹۲۵۹ مورخ ۱۴۰۲/۰۵/۰۳ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بزرگمهر قائلان انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می شود

References

1. Gimbin, J., Chuah, T. G., Choong, T. S. Y., Fakhru'l-Razi, A., 2005. “Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 36, pp. 1056–1065.
2. Lee, B. K., Jung, K. R., Park, S. H., 2008. “Development and application

15. Saeed, F., Al-Garni, A. Z. 2007. Analysis Method for Inertial Particle Separator. *JOURNAL OF AIRCRAFT*.
16. Pishbin, S.I., Moghiman, M., 2010. "Optimization of cyclone separators using genetic algorithm," *International Review of Chemical Engineering*, Vol. 2, pp. 683-691.
17. Atkinson, A. C., Donev, A. N., 2008. *Optimum Experimental Designs*: Oxford University Press.
18. Gardiner, W.P., Gettinby, G., 1998. *Experimental Design Techniques in Statistical Practic*. Glasgow: Woodhead.
19. Akbarzadeh, A., Kouravand, S., Imani, B. M., 2013. Robust Design of a Bimetallic Micro Thermal Sensor Using Taguchi Method. *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 157, pp.188-198.
- inlet," *Powder Technol.*, Vol. 305, pp. 48-55.
11. Zhang, Z.W., Li, Q., Zhang, Y.H., Wang, H.L., 2022. "Simulation and experimental study of effect of vortex finder structural parameters on cyclone separator performance", *Separation and Purification Technology*, Vol.286.
12. Wang, L., Chen, E., Ma, L., Yang, Z., Li, Z., Yang, W., Wang, H., Chang, Y., 2022. "Numerical simulation and experimental study of gas cyclone-liquid jet separator for fine particle separation", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 51, pp.43-52.
13. Abdi Chaghakaboodi, H., Saidi, M., 2023 "Numerical study of gas-solid flow in a square cyclone separator with different vortex finders", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.194,pp.623-635.
14. Pope, S.B., 2007. *Turbulence Flows*. Cambridge University Press, New York.