

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Investigation of the effects of using ribs on cyclone's vortex finder on its performance

Zahra Tarin¹, Abdulrahman Bahrami², Mohsen Goodarzi³, Farshid Ghorbani-Shahna^{4,*}

¹ Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

² Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

³ Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

⁴ Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

Received: 2020-03-08

Accepted: 2021-10-01

ABSTRACT

Introduction: Generally, geometrical parameters of the cyclone have a profound effect on determining its performance. The air outlet (Vortex Finder) as one of the cyclone's components has a significant impact on the cyclone's internal flow pattern, pressure drop and even dust removal efficiency.

Material and Methods: Two different air outlets were designed in order to be easily installed and removed. The ribs (both in the opposite and the same swirl direction with the air flow) were inserted at the inner wall of the vortex finder. The step length of the blades was calculated to be 1.5. The dust feeder was injected the silica particles with a concentration about of 2.1 gr/m³ into the inlet air. The results of dust removal efficiency of the cyclone were calculated and compared for three groups of total dust, PM₁₀ and PM_{2.5} in different experimental conditions.

Results: Installation of spiral blades in same swirl direction as the air flow inside the cyclone increased 7.75, 7.73 and 6.75 percent in total efficiency, PM₁₀ and PM_{2.5}, respectively. The dust removal efficiencies for total dust, PM₁₀ and PM_{2.5} increased by 2.6%, 2.33% and 1.5%, respectively, when the swirl direction of ribs and air flow was the opposite. The effect of helical blades on pressure drop for the first experimental setup (same direction) decreased by (-2.5%) and in the second one (opposite direction) increased by (+2.03%). The best quality factor was also calculated for the cyclone with the blade aligned with the air flow direction.

Conclusion: Use of ribs in the inner wall of the cyclone vortex finder, especially when the rotation direction of the ribs and airflow are the same, leads to a decrease in pressure drop and increase in dust collection efficiency which finally leads to improvement of cyclone performance.

Keywords: Cyclone, Dust collector, Vortex finder, Efficiency, Pressure drop, Quality factor

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Tarin Z, Bahrami A, Goodarzi M, Ghorbani-Shahna S. Investigation of the effects of using ribs on cyclone's vortex finder on its performance. *J Health Saf Work*. 2022; 12(2): 324-338.

1. INTRODUCTION

Cyclones are one of the most widely used and inexpensive equipment in the control of airborne particles. In cyclones, the mechanism of separation of solid particles from the two-

phase solid-gas flow is done by centrifugal force. Cyclone can be manufactured in various sizes and does not require regular replacement of its components, providing much less maintenance than filter-based method. Despite many

* Corresponding Author Email: fghorbani@umsha.ac.ir

advantages of cyclone-based particle separation, insufficient removal efficiency limits its use in fine particle removal. Since cyclones have been widely used in various industries, a considerable number of experimental and theoretical studies have been performed on their performance. The air outlet (Vortex Finder) as one of the cyclone's components has a significant impact on the cyclone's internal flow pattern, pressure drop and even dust removal efficiency.

2. MATERIAL AND METHODS

This study was performed with a high efficiency Stairmand cyclone. Two different air outlets were designed in order to be easily installed and removed. The ribs (both in the opposite and the same swirl direction with the air flow) were inserted at the inner wall of the air outlet. The step length of the blades was calculated to be 1.5. The dust feeder was injected the silica particles with a concentration about of 2.1 gr / m³ into the inlet air. Furthermore, a dust counter was measured particle concentration; cyclone's pressure drop was read using a manometer. The results of dust removal efficiency of the cyclone were calculated for three groups of total dust, PM₁₀ and PM_{2.5} in different

experimental conditions. Each experiment was repeated at least 3 times for three cyclones. The size distribution of the particles entering the cyclone was from 0.23 to greater than 20 micrometers. In order to design these two models of air flow outlet, a wire with diameter of 2 millimeters was used to create spiral blades. the ratio (P/D) was used to calculate the pitch length of the spiral blades, where P is equal rib pith and D is the diameter of the vortex finder. The value of this ratio was calculated as P/D = 1.5. the inlet airflow rate was 108 m³/h, which was provided using a back centrifugal fan with a power of 1 hp and rotation speed of 1450 rpm.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The average particle size distribution concentration is showed in 16 ranges in Table 1. The average of inlet and outlet particle concentration as well as pressure drop in cyclones are presented in Table 2. The highest capturing efficiency increase was observed for the overall capturing alongside the PM₁₀ and PM_{2.5} particles in cyclone with the same internal blade rotation direction as the cyclone air outlet flow. The normal Stairmand cyclone had the lowest particle capturing efficiency for all three states (overall efficiency, PM₁₀, and PM_{2.5}).

Table 1. The average size particle distribution

(µm)Particle size range	Concentration (mg/m ³)	(µm)Particle size range	Concentration (mg/m ³)
0.23-0.3	2.973±0.3	2-3	175.754±6.13
0.3-0.4	3.614±0.1	3-4	240.028±0.64
0.4-0.5	3.322±0.05	4-5	240.198±3.01
0.5-0.65	0.864±0.02	5-7.5	945.156±12.24
0.65-0.8	6.964±.22	7.5-10	137.140±1.09
0.8-1	19.764±0.61	10-15	24.774±0.02
1-1.6	8.687±0.72	15-20	13.619±0.1
1.6-2	44.216±2.1	20<	428.728±31.43

Table 2. Performance result of experimented cyclones

	Inlet Particle Concentration (mg)			Outlet Particle Concentration (mg)			Pressure Drop (pa)
	Total dust	PM ₁₀	PM _{2.5}	Total dust	PM ₁₀	PM _{2.5}	
Cyclone 1	2057±0.11	1573±0.06	224±.13	524±0.02	521±0.07	107±0.01	406.7
Cyclone 2	2214±0.04	1792±0.09	241±0.01	693±0.04	691±0.06	123±0.05	424.6
Cyclone 3	2271±0.08	1820±0.02	261±0.02	745±0.01	744±0.01	140±0.09	416.2

Cyclone 1: Cyclone with ribs in the same swirl direction as the air flow, cyclone 2: cyclone with the ribs in the opposite swirl direction of the air flow, cyclone 3: cyclone without ribs

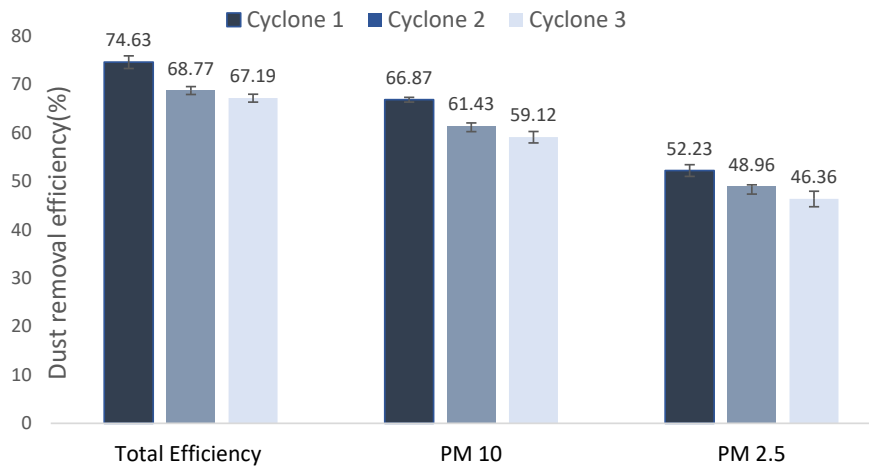


Fig. 1. Comparison of particle collection efficiency in three cyclone

As a result of the alignment of the directions in the first version, the particle momentum is reduced, resulting in a greater amount of particles falling, thereby increasing the efficiency of the collection. Additionally, studies show that the turbulence intensity of fluid inside the cyclone near the vortex finder causes more pressure differences inside the cyclone than in the conical section. This pressure difference traps the particles in the outlet tube by creating a negative effect, thus negatively affecting the collection efficiency. According to the reports on flow pattern and turbulence intensity in the studies up to now, it is possible to consider that the spiral blades within the vortex finder create an obstacle that causes the particles that are flowing to the cyclone's outlet due to the forced vortex, as well as the particles that have been dragged to the outlet and out of the cyclone due to the short-circuit current, to lose their kinetic energy and be separated from the airflow because of the better flow direction and friction between the particles and the blades. This means that any factor capable of controlling the effect of short-circuit current at the entrance of the vortex finder can affect particle collection efficiency. In the second cyclone design in which the direction of the spiral blades is in the opposite direction of the cyclone flow, although the collision of particles with the spiral blades leads to the particles losing their kinetic energy and being separated from the airflow, given that the airflow is not aligned with the direction of the blades, the turbulence created in the flow causes the particulate matter expected to fall to exit the cyclone along with the airflow. As a result, despite the increased

collection efficiency, it is still lower compared to the first version. Comparison of particle collection efficiency in three cyclones showed in Fig. 1. The cyclone with the swirl ribs coherent to air flow had the lowest pressure drop while the cyclone with the swirl ribs opposite to air flow had the highest pressure drop. When the blades are aligned with the airflow, the results indicate a 2.5% reduction in pressure drop; however, when the blades are in the opposite direction, it increases by 2.03%. As a result of the augmented centrifugal force and better flow direction, the amount of resistance to the flow is predicted to be lower in the first version, thus reducing the pressure drop. Alignment decreases secondary flows of fluids, which, in turn, causes pressure drops to decrease. Possibly, the spiral blades in the vortex finder contribute to better and more uniform flow, hence, helping to determine the vortex flow. Ultimately, given that the change in pressure drop inside the vortex finder plays an effective role in the overall pressure drop of the cyclone, as expected, the pressure drop plummets in the first cyclone compared to the normal cyclone. Because the spiral blades in the second version face in the opposite direction to the cyclone flow, there is an increase in the pressure drop due to secondary flow within the flowing fluids, as well as turbulence generated in this part of the design

The results show the outlet air flow with a spiral blade increased the capturing efficiency, whether inline or opposite to the flow. But the pressure drop test showed different results. It is predicted that the first state has a lower flow resistance because of its increased centrifugal force and better flow

guidance, which leads to a lower pressure drop. While, the second state that is in the opposite direction of the cyclone because of its spiral blades has a higher pressure drop because it creates secondary flows in the passing fluids, which leads to chaos in this area.

4. CONCLUSIONS

The results showed that the use of ribs with a

step length of 1.5 in the inner wall of the cyclone air outlet can improve the dust removal efficiency for all of sizes. Ribs with the same direction with air flow showed more efficiency compared to the ones with the opposite direction of the air flow. Not only does the use of ribs with the same swirl direction increases the dust removal efficiency, but also it decreases the total pressure drop of cyclone and enhance the quality factor.

بررسی تأثیر ایجاد تیغه‌های ماریپچ در لوله خروجی هوای سیکلون بر عملکرد آن

زهرا تارین^۱، عبدالرحمان بهرامی^۲، محسن گودرزی^۳، فرشید قربانی شهنا^{۴*}

^۱ قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۲ قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۳ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۴ قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۹

چکیده

مقدمه: مطالعات نظری و تجربی زیادی در خصوص ارتقاء عملکرد سیکلون ها انجام شده است. به طور کلی پارامترهای هندسی سیکلون در تعیین عملکرد آن نقش اساسی را بر عهده دارند. لوله خروجی هوا به عنوان یکی از اجزاء سخت‌افزاری سیکلون، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در الگوی جریان داخلی سیکلون، افت فشار و حتی بازده غبارگیری دارد.

روش کار: مطالعه حاضر بر روی یک سیکلون مدل استیرمند بازده بالا انجام شد. دو مدل از لوله خروجی هوای سیکلون به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که بتوان آن را به راحتی از سیکلون جدا و مجدد به آن اضافه نمود. درون جداره داخلی لوله هوای خروجی تیغه‌های ماریپچ (هم جهت و خلاف جهت با جریان هوا) تعبیه شد. فاصله طول گام در تیغه‌ها معادل ۱/۵ محاسبه شد. دستگاه مولد غبار، ذرات سیلیس را با غلظت حدود $2/1 \text{ gr/m}^3$ به درون هوای ورودی تزریق می‌نمود. از دستگاه شمارنده ذرات برای اندازه‌گیری غلظت ذرات استفاده شد و با استفاده از یک مانومتر، افت فشار سیکلون قرائت شد. نتایج بازده غبارگیری سیکلون برای سه گروه ذرات کل، PM_{10} و $PM_{2.5}$ در حالات مختلف محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: تعبیه تیغه‌های ماریپچی هم‌راستا با جهت جریان هوای چرخشی داخل سیکلون باعث افزایش ۷/۷۵، ۷/۳۳ و ۶/۷۵ درصدی در بازده کل، PM_{10} و $PM_{2.5}$ شد. نتیجه بازده جمع‌آوری در حالتی که جهت ماریپچ تیغه‌ها در خلاف جهت چرخش هوای خروجی بود به ترتیب افزایش ۲/۶ و ۲/۳۳ و ۱/۵ درصد را نشان داد. اثر تیغه‌های ماریپچ بر افت فشار در حالت اول (هم‌جهت) سبب کاهش افت فشار (۲/۵-٪) و در حالت دوم (خلاف جهت) سبب افزایش افت فشار گردید (۲/۰۳+٪). بهترین فاکتور کیفیت نیز مربوط به سیکلون با تیغه هم‌راستا با جریان بود.

نتیجه‌گیری: استفاده از تیغه‌های ماریپچ در دیواره داخلی لوله خروجی سیکلون بخصوص در حالتی که هم‌راستا با جهت چرخش جریان هوا باشد با افزایش بازده غبارگیری و کاهش افت فشار در مجموع منجر به بهبود عملکرد و کیفیت سیکلون می‌شود و در حالتی که تیغه‌های ماریپچ هم‌جهت با جریان هستند سبب کاهش افت فشار در سیکلون می‌شود.

کلمات کلیدی: غبارگیر، سیکلون، لوله خروجی هوا، بازده، افت فشار، ضریب کیفیت

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: fghorbani@umsha.ac.ir

مقدمه

خروجی، منجر به افزایش افت فشار می‌گردد؛ در حالیکه، شکل مخروطی آن نقش قابل توجهی در بازده جمع‌آوری ندارد (۱۳). جعفرنژاد با مطالعه بر روی اشکال واگرا و همگرای لوله خروجی به این نکته دست یافت که استفاده از لوله خروجی همگرا سبب افزایش سرعت مماسی جریان شده و در نتیجه می‌تواند نقش قابل توجهی در جمع‌آوری ذرات ریز داشته باشد (۱۴). در مطالعه Ficiçi که بر روی سه سیکلون با لوله خروجی هوای استوانه‌ای شکل که در اندازه قطر با هم اختلاف داشتند انجام شد به این نتیجه رسید که افزایش قطر لوله خروجی منجر به کاهش افت فشار می‌گردد به گونه‌ای که کمترین افت فشار مربوط به سیکلونی بود که بیشترین قطر لوله خروجی هوا را داشت. باین‌وجود نتایج تأثیر قطر بر بازده جمع‌آوری آن، برعکس نتایج حاصل از افت فشار بود (۱۵). مشابه چنین نتایجی را می‌توان در مطالعات سایر محققان در ارتباط با بررسی اثر تغییرات هندسی لوله خروجی هوا بر عملکرد سیکلون و الگوی جریان، یافت (۹، ۱۶-۱۹). در مطالعه Wu که به بررسی شکل مخروطی مقطع ورودی لوله خروجی هوا همراه با وجود شکاف بر دیواره‌ی آن (مستقیم و مارپیچ) پرداخت، نتایج نشان داد مقدار افت فشار به میزان ۷۳ درصد کاهش و بازده جمع‌آوری به میزان ۹ درصد افزایش یافته است (۶). تأثیر وجود شکاف در لوله خروجی هوا در مطالعه Xu نشان داد که این تغییر می‌تواند تأثیر مثبت بر عملکرد سیکلون داشته باشد به گونه‌ای که سبب افزایش بازده جمع‌آوری حدود ۲ تا ۳ درصد و کاهش افت فشار در حدود ۳۰ درصد گردید (۲۰). همچنین در مطالعه Fu که بر روی یک سیکلون با مقیاس صنعتی انجام گرفت، لوله خروجی هوا با شکاف‌هایی در دیواره‌ی آن با هدف بررسی عملکرد سیکلون در جمع‌آوری ذرات ریز طراحی شد، نتایج نشان داد افت فشار به میزان ۹ درصد کاهش و راندمان جمع‌آوری به میزان ۴۵/۵ درصد افزایش می‌یابد (۲۱). Pei با قرار دادن ۴ تیغه فلزی متقاطع درون لوله خروجی هوا در یک سیکلون مدل Lapple به این نتیجه رسید که بین قطر هسته داخلی لوله خروجی هوا و افت فشار رابطه مستقیم وجود دارد به گونه‌ای که هرچه

سیکلونها یکی از تجهیزات پرکاربرد و کم‌هزینه در کنترل ذرات هوا برد می‌باشند (۱). از مزایای سیکلون در صنایع مختلف، سهولت ساخت آن، هزینه کم و سازگاری با شرایط دشوار صنعتی می‌باشد که به یکی از مهم‌ترین دستگاه‌های غبارگیر تبدیل شده است. این مزایا باعث شده است که از سیکلون هم به عنوان غبارگیر و هم در فرآیندهایی نظیر درجه‌بندی ذرات و نمونه‌برداری استفاده شود (۲-۴). نقطه‌ضعف عمده سیکلون‌ها در مقیاس صنعتی، بازده نسبتاً کم آن‌ها در جمع‌آوری ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرومتر می‌باشد (۵). در سیکلون مکانیسم جداسازی ذرات جامد از جریان دوفازی جامد-گاز به واسطه‌ی نیروی گریز از مرکز صورت می‌گیرد (۶). از زمانی که سیکلون‌ها به‌طور گسترده در صنایع مختلف به کار گرفته شده‌اند تعداد قابل توجهی از مطالعات تجربی و نظری بر عملکرد آن‌ها صورت گرفته است (۲). لوله خروجی هوا (Vortex Finder) به‌عنوان یکی از اجزاء سخت‌افزاری سیکلون، تأثیر قابل توجهی در الگوی جریان داخلی سیکلون دارد که به میزان قابل توجهی بر افت فشار اثرگذار است و حتی می‌تواند بر رسوب ذرات مؤثر باشد؛ بنابراین بسیاری از مطالعات اثرات ابعاد و اشکال لوله خروجی هوا را بررسی کرده‌اند (۷، ۸). در مطالعات Elsayed (۹)، Wei (۱۰) و Wasilewski (۱۱)، تأثیر قطرهای مختلف، طول و موقعیت قرارگیری لوله خروجی هوا با شبیه‌سازی جریان سیکلون مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که این پارامترها در بازده جمع‌آوری و افت فشار سیکلون نقش پراهمیتی دارند. در مطالعه‌ای که توسط Xiang و همکارانش منتشر شد، شش سیکلون با آرایش متفاوت برای لوله خروجی هوا به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت، یافته‌ها نشان داد که بازده سیکلون با لوله خروجی هوا مخروطی شکل بیشتر از سیکلون با مقطع خروجی استوانه‌ای است (۱۲). در مطالعه Lim که دو شکل از لوله خروجی هوا یکی در حالت استوانه‌ای و دیگری مخروطی مورد آزمایش قرار گرفت، نتایج نشان داد که در هر دو شکل کاهش قطر لوله

است را بهبود بخشند اما می‌توانند تا حدودی برای مقابله با این چالش که ذرات ۲/۵ میکرومتر کیفیت هوای زندگی ما را تهدید می‌کنند مؤثر باشند (۳، ۲۶، ۲۷). مطالعات اندکی در ارتباط با به‌کارگیری تیغه‌های مارپیچی در سیکلون موجود است که تا به امروز هیچ‌یک از مطالعات به ایجاد چنین تغییری در لوله خروجی هوا نپرداخته‌اند. این مطالعه با هدف تعیین تأثیر به‌کارگیری تیغه‌های مارپیچ در دو حالت چرخش تیغه‌ها به‌صورت هم‌جهت و خلاف جهت چرخش هوای خروجی از سیکلون با احتمال تحت تأثیر قرار دادن الگوی جریان سیکلون بر عملکرد آن طراحی و اجرا شده است.

استفاده از نسبت گام تیغه‌ها به قطر لوله خروجی هوا با فرض طول گام (pitch) به میزان ۱/۵ برابر قطر لوله خروجی هوا (D_e) در دو جهت مخالف محاسبه گردیده است.

روش کار

در مطالعه حاضر از یک سیکلون مدل استیرمند بازده بالا (Stairmand High Efficiency) مطابق با شکل (۱) که بالاترین بازده را در بین سیکلون‌های کلاسیک دارا است (۲۸)، با مشخصات ابعادی ارائه شده در جدول (۱) ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش در شرایط فشار اتمسفر و دمای محیط انجام شد. جهت تزریق آلاینده از یک دستگاه Dust Feeder که برای این مطالعه طراحی و ساخته شده بود، استفاده گردید. دستگاه Dust Feeder با تنظیم ولتاژ، توانایی تولید غبار با مقادیر متفاوتی دارد که با اندازه‌گیری خروجی‌های متعدد از این دستگاه (حداقل ۱۰ مرتبه به‌طور متوالی) با انحراف معیار ۰/۰۹ دقت و صحت آن ارزیابی گردید. از ذرات سیلیس با چگالی ۲۶۵۰ kg/m^۳ به‌عنوان آلاینده استفاده شد، دستگاه Dust Feeder ذرات را با غلظت حدود ۲/۱۸ gr/m^۳ به درون‌هوی ورودی تزریق می‌نمود. از دستگاه Aerosol spectrometer and dust monitor, series ۱/۱۰۸ ساخت شرکت آلمانی Grimm برای اندازه‌گیری آنلاین غلظت ذرات و توزیع

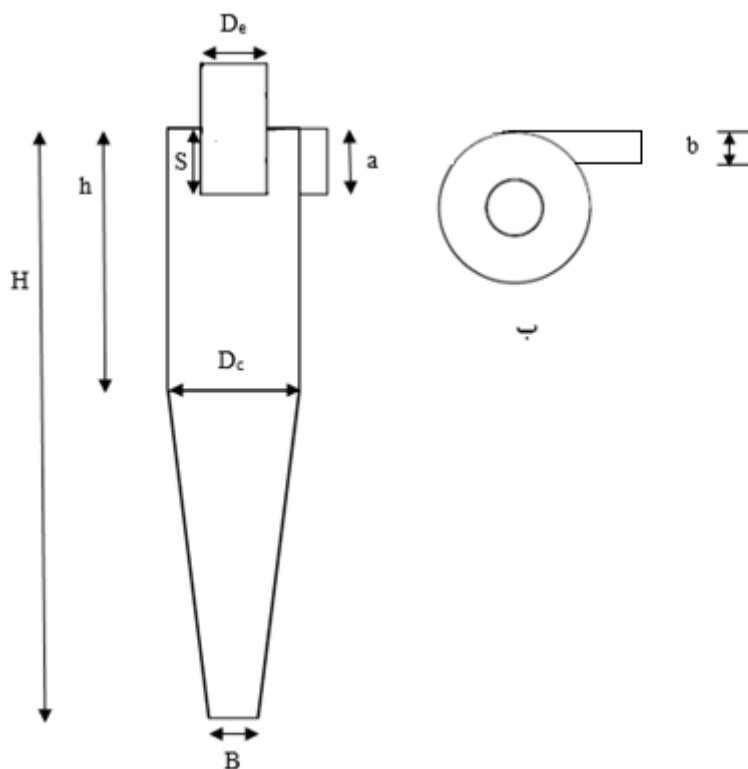
این قطر کوچک‌تر باشد افت فشار نیز کمتر خواهد شد درحالی‌که تأثیر این رابطه بر بازده جمع‌آوری مستقیم نیست (۸، ۲۲). فراهانی با به‌کارگیری تیغه مارپیچی در بدنه استوانه‌ای سیکلون متوجه شد که این تغییر می‌تواند منجر به افزایش بازده جمع‌آوری و هم‌زمان افزایش افت فشار گردد (۲۳). همچنین Lee با ایجاد تغییر مشابه در بدنه سیکلون به این نتیجه رسید که این تیغه‌ها نقش مهمی در افزایش بازده جمع‌آوری سیکلون در دبی پایین دارند (۲۴).

نتایج مطالعات نشان می‌دهند که نمی‌توان انتظار داشت که همواره تغییر در ابعاد و اشکال لوله خروجی هوا بتواند به‌طور هم‌زمان باعث افزایش راندمان و کاهش افت فشار گردد؛ از آنجا که تغییر در ابعاد لوله خروجی هوا و یا شکل آن مستقیماً بر سرعت جریان مماسی سیکلون اثر می‌گذارد و با وجود نقش مثبت آن در راندمان جمع‌آوری، از طرفی باعث افزایش اصطکاک بین جریان سیال و دیواره و در نتیجه منجر به افزایش افت فشار می‌گردد (۸). مطالعات متعددی سعی در تعریف یک تنظیمات بهینه بین افت فشار و بازده جمع‌آوری سیکلون دارند با این حال به دلیل عدم وجود شواهد عینی روند بهینه‌سازی ناقص مانده است. بنابراین یک شاخص باید برای ارزیابی عینی و کامل عملکرد سیکلون، بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار در نظر گرفت. ضریب کیفیت (Quality Factor) فیلتر که هم کارایی تصفیه و هم مقاومت هوا را در نظر می‌گیرد و معمولاً برای فیلترها استفاده می‌شود می‌تواند مستقیماً برای قضاوت در مورد عملکرد سیکلون مورد استفاده قرار گیرد (۲۵). ضریب کیفیت با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_c = \ln\left(\frac{1}{p}\right) \quad ۱$$

$$\Delta p$$

که در آن p بیانگر میزان نفوذ یا عبور ذرات از سیکلون و Δp برابر است با افت فشار است. تغییرات اشاره شده اگرچه نمی‌توانند به‌طور خارق‌العاده بازده جمع‌آوری ذرات کوچک که جداسازی آن‌ها دشوار



الف

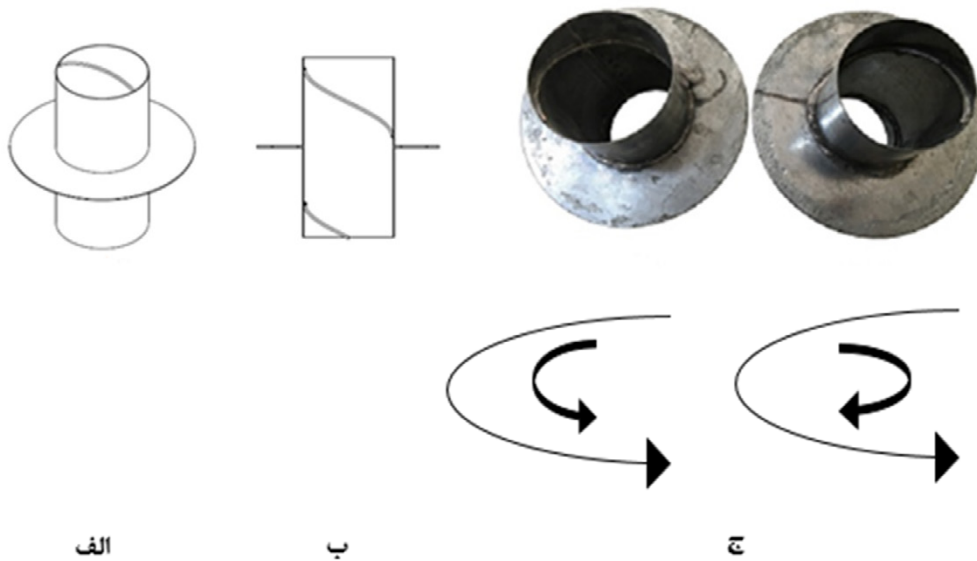
شکل ۱. طرح شماتیک از ابعاد سیکلون

از آن برای نمونه‌گیری کوتاه‌مدت در ورودی و خروجی سیکلون استفاده گردید. دستگاه شمارشگر برای نشان دادن تراکم ذرات در سه گروه از ذرات کل، PM_{10} و $PM_{2.5}$ تنظیم شد. یک فشارسنج مدل MEDM 500 ساخت کشور انگلیس، جهت اندازه‌گیری فشار کل در ورودی و خروجی سیکلون به‌منظور اندازه‌گیری افت فشار استفاده شد. سیکلون به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شد که لوله خروجی هوا همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است بتواند به‌راحتی از سیکلون جدا و مجدد به آن اضافه شود، بنابراین دو لوله خروجی هوا، یکی دربرگیرنده تیغه‌هایی هم‌جهت با جریان هوای درون لوله خروجی و دیگری در خلاف جهت آن ساخته شد. هر آزمایش برای سه سیکلون حداقل ۳ بار تکرار

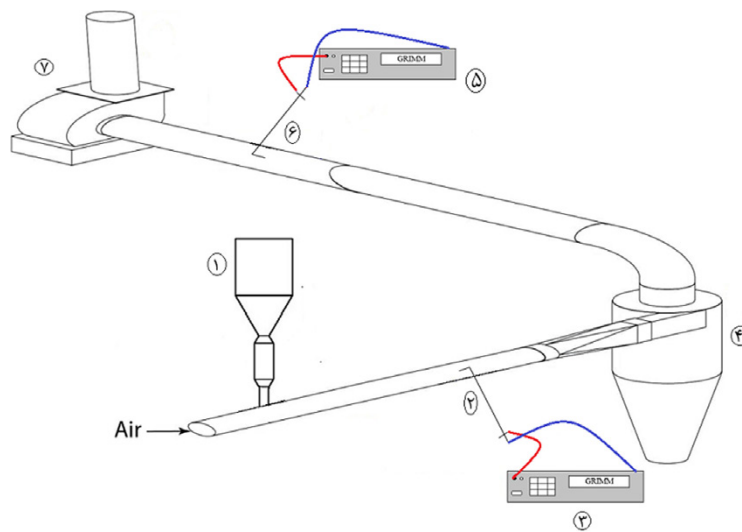
جدول ۱. نسبت ابعادی سیکلون، $D_c = 14 \text{ cm}$

متغیر	ابعاد (cm)
a/D_c	۷
b/D_c	۲/۸
H/D_c	۵۶
h/D_c	۲۱
D_e/D_c	۷
B/D_c	۵/۲۵
s/D_c	۷

اندازه ذرات با دبی ۱/۲ لیتر بر دقیقه استفاده شد. دستگاه شمارنده ذرات جهت اندازه‌گیری غلظت ذرات مجهز به یک پروب نمونه‌برداری ایزوکنتیک است که



شکل ۲. الف - طراحی لوله خروجی، ب - نمای داخلی لوله خروجی با تیغه مارپیچی، ج - قطعات ساخته شده در دو جهت



شکل ۳. طرح شماتیک از پایلوت آزمایشگاه: (۱) دستگاه Dust Feeder ۲ و (۶) پروب نمونه برداری ۳ و (۵) دستگاه شمارنده ذرات (۴) سیکلون استیرمند بازده بالا (۷) فن

شد. دامنه سایز ذرات ورودی به سیکلون از ۰/۲۳ تا اندازه‌های بزرگ‌تر از ۲۰ میکرومتر بود. در طراحی این دو مدل لوله خروجی از مفتولی به قطر دو میلی‌متر برای ایجاد تیغه مارپیچی در دیواره درونی آن استفاده شد. برای محاسبه‌ی طول گام تیغه‌های مارپیچ از نسبت (P/D) استفاده شد که در آن P برابر با طول گام (Rib Pitch) و D قطر لوله خروجی هوا است. مقدار این نسبت برابر با $1P/D=5$ محاسبه گردید (۲۳). دبی هوای ورودی به سیکلون $108 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد که با استفاده از یک فن سانترفیوژ بک وارد با توان ۱ اسب بخار و دور موتور 1450 rpm تأمین گردید. در شکل (۳) طرح شماتیک از پایلوت آزمایشگاهی نشان داده شده است.

شد. دامنه سایز ذرات ورودی به سیکلون از ۰/۲۳ تا اندازه‌های بزرگ‌تر از ۲۰ میکرومتر بود. در طراحی این دو مدل لوله خروجی از مفتولی به قطر دو میلی‌متر برای ایجاد تیغه مارپیچی در دیواره درونی آن استفاده شد. برای محاسبه‌ی طول گام تیغه‌های مارپیچ از نسبت (P/D) استفاده شد که در آن P برابر با طول گام (Rib Pitch) و D قطر لوله خروجی هوا است. مقدار این نسبت برابر با $1P/D=5$ محاسبه گردید (۲۳). دبی هوای ورودی به سیکلون $108 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد که با استفاده از یک فن سانترفیوژ بک وارد با توان ۱ اسب بخار و دور موتور 1450 rpm تأمین گردید. در شکل (۳) طرح شماتیک از پایلوت آزمایشگاهی نشان داده شده است.

یافته‌ها

استیرمند مشاهده شد. مقایسه افت فشار سه سیکلون نشان داد که کمترین افت فشار در سیکلون هم‌جهت با جهت جریان خروجی هوا و بیشترین افت فشار در سیکلون غیر هم‌جهت با جهت جریان هوا، مشاهده گردید. نمودار مقایسه‌ای بازده جمع‌آوری سه سیکلون در شکل (۴) نشان داده شده است.

بیشترین میزان تغییر در بازده جمع‌آوری مربوط به سائز ذرات PM_{10} است که مقدار ۷/۷۵ درصد افزایش در سیکلون ۱ نشان می‌دهد و کمترین تغییر در بازده جمع‌آوری کل، در سیکلون خلاف جهت با مقدار ۱/۵ درصد مشاهده شد.

محاسبه‌ی ضریب کیفیت سه سیکلون در جدول شماره (۴) نشان داده شده است که نتیجه محاسبات بیانگر بیشترین مقدار برای سیکلون هم‌جهت است.

توزیع غلظت ذرات در ۱۶ کانال در جدول شماره (۲) ارائه شده است. مقادیر غلظت‌های ورودی و خروجی ذرات و همچنین اندازه‌گیری افت فشار در دو حالت هم‌جهت و خلاف جهت تیغه‌های ماریچ درون لوله خروجی هوا با جهت جریان چرخشی هوای خروجی از سیکلون در مقایسه با سیکلون استیرمند بازده بالا (بدون تغییر) در جدول (۳) ارائه شده است.

بیشترین میزان افزایش بازده جمع‌آوری کل برای ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ در سیکلون با لوله خروجی هوایی که جهت چرخش تیغه‌های جداره داخلی آن هم‌جهت با جریان هوای خروجی از سیکلون بود، مشاهده گردید. کمترین مقدار در بازده جمع‌آوری ذرات در هر سه حالت (بازده کل، PM_{10} و $PM_{2.5}$) در سیکلون معمولی طرح

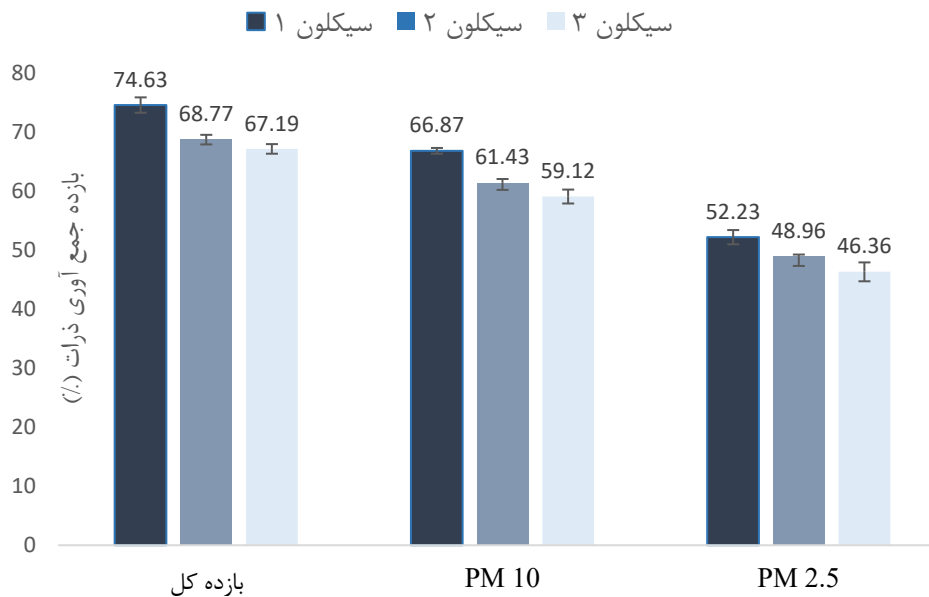
جدول ۲. میانگین توزیع غلظت ذرات ورودی

محدوده اندازه ذرات (μm)	غلظت (mg/m^3)	محدوده اندازه ذرات (μm)	غلظت (mg/m^3)
۰/۰-۲۳/۳۰	۲/۰±۹۷۳/۳	۳-۲	۱۷۵/۶±۷۵۴/۱۳
۰/۰-۳۰/۴۰	۳/۰±۶۱۴/۱۰	۴-۳	۲۴۰/۶۴±۰/۲۸
۰/۰-۴۰/۵۰	۳/۰±۳۲۲/۰۵	۵-۴	۲۴۰/۳±۱۹۸/۰۱
۰/۰-۵۰/۶۵	۰/۰±۸۶۴/۰۲	۷-۵/۵	۹۴۵/۱۲±۱۵۶/۲۴
۰/۰-۶۵/۸۰	۶/۰±۹۶۴/۲۲	۷/۱۰-۵	۱۳۷/۱±۱۴۰/۰۹
۰/۱-۸۰	۱۹/۰±۷۶۴/۶۱	۱۵-۱۰	۲۴/۰±۷۷۴/۰۲
۱-۱/۶	۸/۰±۶۸۷/۷۲	۲۰-۱۵	۱۳/۰±۶۱۹/۱
۱/۲-۶	۴۴/۲±۲۱۶/۱	>۲۰	۴۲۸/۳۱±۷۲۸/۴۳

جدول ۳. نتایج عملکرد سیکلون‌های مورد آزمایش

افت فشار (Pa)	غلظت ذرات ورودی به سیکلون (mg)			غلظت ذرات خروجی از سیکلون (mg)			سیکلون
	ذرات کل	PM_{10}	$PM_{2.5}$	ذرات کل	PM_{10}	$PM_{2.5}$	
۴۰۶/۷	۲۰۵۷±۰/۱۱	۱۵۷۳±۰/۰۶	۲۲۴±۰/۱۳	۱۰۷±۰/۰۱	۵۲۱±۰/۰۷	۵۲۴±۰/۰۲	۱
۴۲۴/۶	۲۲۱۴±۰/۰۴	۱۷۹۲±۰/۰۹	۲۴۱±۰/۰۱	۱۲۳±۰/۰۵	۶۹۱±۰/۰۶	۶۹۳±۰/۰۴	۲
۴۱۶/۲	۲۲۷۱±۰/۰۸	۱۸۲۰±۰/۰۲	۲۶۱±۰/۰۲	۱۴۰±۰/۰۹	۷۴۴±۰/۰۱	۷۴۵±۰/۰۱	۳

* سیکلون ۱: سیکلون با تیغه‌های هم‌جهت با جهت جریان، سیکلون ۲: سیکلون با تیغه‌های غیر هم‌جهت با جهت جریان، سیکلون ۳: سیکلون بدون تغییر



شکل ۴. نمودار مقایسه بازده جمع‌آوری ذرات در سه سایکلون

جدول ۴. مقایسه فاکتور کیفیت در سه سایکلون

سایکلون	q_c
سایکلون ۱	$3/4 \times 10^{-10}$
سایکلون ۲	$2/7 \times 10^{-10}$
سایکلون ۳	$2/6 \times 10^{-10}$

بحث

این مطالعه به بررسی اثر وجود تیغه مارپیچی درون دیواره لوله خروجی هوای سایکلون در دو حالت که جهت چرخش تیغه‌ها هم‌جهت و خلاف جهت با جریان هوای خروجی از سایکلون باشد، بر عملکرد آن‌ها در مقایسه با یک سایکلون معمولی طرح استیرمند بازده بالا می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد در هر دو حالت سایکلون با لوله خروجی که تیغه مارپیچی در آن به کار گرفته شده است چه هم‌جهت و چه غیر هم‌جهت با جریان، منجر به افزایش بازده جمع‌آوری گردیده است؛ درحالی‌که میزان افت فشار نتایج متفاوت‌تری را نشان می‌دهد. در سایکلونی که جهت مارپیچ تیغه‌های درون لوله خروجی آن هم‌راستا

با جهت جریان چرخشی داخلی سایکلون بود، مقادیر بازده غبارگیری کل ذرات، PM_{10} و $PM_{2.5}$ سایکلون به ترتیب ۷/۷۵، ۷/۳۳، و ۶/۵۷ درصد نسبت به حالت سایکلون ساده بدون مارپیچ، افزایش یافت. نتیجه بازده جمع‌آوری همچنین در سایکلون دیگر که جهت مارپیچ تیغه‌ها در خلاف جهت چرخش هوای خروجی است به ترتیب ۲/۶، ۲/۳۳ و ۱/۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد. در حالت اول که جهت‌ها هم‌راستا هستند، این هم‌راستایی منجر به کاهش ممنوم ذرات معلق و در نتیجه سقوط بیشتر ذرات و متعاقباً افزایش بازده جمع‌آوری شده است. علاوه بر این مطالعات انجام‌شده نشان داده که شدت آشفستگی سیال درون سایکلون در نزدیکی لوله خروجی هوا بیشتر از قسمت مخروطی آن است که منجر به ایجاد اختلاف فشار درون سایکلون شده که این اختلاف فشار خود عاملی است تا با ایجاد یک تأثیر منفی سبب در دام افتادن ذرات درون لوله خروجی و در نتیجه بر بازده جمع‌آوری سایکلون تأثیر منفی می‌گذارد (۸)؛ بنابراین بر اساس آنچه تا به امروز از الگوی جریان و شدت آشفستگی در مطالعات بیان شده است، می‌توان این احتمال را در نظر گرفت

عاملی تأثیرگذار بر کل افت فشار سیکلون است (۸)، طبق آنچه انتظار می‌رفت در حالت اول سیکلون، افت فشار نسبت به سیکلون معمولی، کاهش می‌یابد. در حالت دوم که جهت مارپیچ تیغه‌ها در خلاف جهت جریان سیکلون است طبیعتاً به دلیل به وجود آمدن جریان‌های ثانویه در سیال عبوری و همچنین ایجاد آشفتگی در این ناحیه منجر به افزایش افت فشار می‌گردد. در مطالعه‌ای که در دیواره داخلی بخش بدنه استوانه‌ای سیکلون انجام شده، از تیغه‌های مارپیچ به کار گرفته شده بود؛ نتایج نشان داد که افت فشار در این سیکلون نسبت به حالت بدون تیغه مارپیچ افزایش می‌یابد. در این مطالعه در رابطه با جهت مارپیچ‌ها و جهت جریان درون سیکلون اشاره‌ای نشده است (۲۳).

ضریب کیفیت به‌طور غیرمستقیم بهره‌وری سیکلونها را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که افزایش بازده به ازای افت فشار (انرژی مصرفی) معیار مناسبی در خصوص مقایسه یا قضاوت طرح‌های مختلف می‌باشد. نتایج نشان داد سیکلونی که جهت چرخش تیغه‌های آن هم‌جهت با چرخش هوای خروجی از سیکلون است نسبت به دو سیکلون دیگر فاکتور کیفیت بالاتری دارد.

نتیجه گیری

رفتار سیال در لوله خروجی هوا از قبیل سرعت جریان و شدت آشفتگی را می‌توان با قرار دادن قطعاتی تغییر داد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تغییرات هندسی لوله خروجی هوا می‌تواند بازده جمع‌آوری ذرات را بهبود ببخشد درحالی‌که منجر به افزایش افت فشار گردد؛ به‌عبارت‌دیگر افزایش بازده جمع‌آوری و کاهش افت فشار به‌طور هم‌زمان کار ساده‌ای نیست. از آنجاکه جریان داخل سیکلون پیچیده و به مشخصات هندسی بسیار وابسته است و با توجه به آنچه در مطالعه حاضر مورد مشاهده قرار گرفت به علت عدم وجود مطالعات مشابه و همچنین ناکافی بودن اطلاعات در زمینه ایجاد چنین تغییری در دیواره‌ی داخلی لوله خروجی هوا، مطالعه حاضر تنها می‌تواند به پیش‌بینی اثرات وجود تیغه‌ی مارپیچ بر بازده

که وجود تیغه‌های مارپیچ درون دیواره خروجی هوا، با ایجاد مانع می‌تواند سایر ذراتی که از طریق اتصال کوتاه جریان به درون لوله خروجی هوا کشیده و از سیکلون خارج می‌شوند را به دلیل برخورد با این تیغه‌ها و افزایش اصطکاک بین ذرات و تیغه‌های مارپیچ، از جریان هوا جدا نماید. در مطالعه‌ای که در سیکلون با لوله خروجی شکاف دار انجام شد Fu توانست تقریباً اثر اتصال جریان کوتاه را با استفاده از شکاف از بین ببرد و در نتیجه بازده جمع‌آوری را بهبود بخشد (۲۱). به‌عبارت‌دیگر هر عاملی که بتواند اثر اتصال کوتاه جریان در ورودی لوله خروجی هوا را به شیوه‌ای کنترل نماید می‌تواند بر راندمان جمع‌آوری ذرات اثرگذار باشد. مشابه چنین نتیجه‌ای در تعداد محدودی از مطالعات گزارش شده است (۲۳، ۲۹). در سیکلون طرح دوم که در آن جهت تیغه‌های مارپیچ آن در خلاف جهت جریان سیکلون است اگرچه برخورد ذرات به تیغه‌های مارپیچ منجر به از دست دادن انرژی جنبشی و جدا شدن از جریان هوا می‌گردد اما به دلیل عدم هم‌راستایی جریان هوا با جهت چرخش تیغه‌ها، دچار اغتشاش شده و بخشی از ذرات معلقی که انتظار می‌رود سقوط کنند همراه با جریان هوا مجدداً از سیکلون خارج می‌شوند (۲۱)، در نتیجه اگرچه بازده جمع‌آوری افزایش می‌یابد اما نسبت به حالت اول این میزان کمتر است.

در حالت هم‌راستایی تیغه‌ها با جریان هوا، نتایج نشان می‌دهد که افت فشار به میزان ۲/۵ درصد کاهش و در حالت مخالف جریان، افت فشار به میزان ۲/۰۳ درصد افزایش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود که در حالت اول به دلیل تقویت نیروی گریز از مرکز و هدایت بهتر جریان، اثر مقاومت بر روی جریان کمتر بوده که در نتیجه منجر به کاهش افت فشار می‌گردد. علاوه بر این، هم‌راستایی سبب کاهش جریان‌های ثانویه در سیال می‌گردد که متعاقباً کاهش افت فشار را به دنبال خواهد داشت. احتمالاً وجود تیغه‌های مارپیچ در لوله خروجی سبب هدایت بهتر و یکنواخت‌تر جریان می‌گردد و در نتیجه هدایت چرخشی جریان به کمک تیغه‌ها صورت می‌گیرد و در نهایت از آنجایی که تغییر افت فشار در لوله خروجی

با جهت جریان چرخشی داخل سیکلون نسبت به دو سیکلون دیگر میزان بهره‌وری بالاتری خواهد داشت. با توجه به موارد مذکور می‌توان نتیجه گرفت که افزودن تیغه‌های مارپیچ هم سو با جهت چرخش جریان هوا به جدار داخلی لوله خروجی هوای سیکلونها با فاصله گام $1/D5$ علاوه بر افزایش بازده کل غبارگیری در جمع‌آوری ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ نیز اثرگذار بوده و موجب کاهش افت فشار سیکلون شده است که در مجموع موجب ارتقاء ضریب کیفیت و عملکرد سیکلونها می‌شود. از محدودیت‌های مطالعه می‌توان به عدم دسترسی هم‌زمان به دو عدد شمارنده ذرات اشاره نمود که این مشکل با انجام آزمایشات پی‌درپی و اطمینان از ثابت نگه‌داشتن غلظت و توزیع سایز ذرات در ورودی و خروجی سیکلون تا حدود زیادی رفع گردید. همچنین عدم دسترسی به Dust Feeder با دقت بالا موجب گردید طی انجام طرح تحقیقاتی با ابتکارات و طراحی‌ها انجام‌شده در طی مطالعه و به‌کارگیری تنظیمات متعدد در نهایت امکان استفاده از دستگاه ساخته‌شده، فراهم گردد که از ثبات و دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی بهداشت حرفه‌ای به شماره ۹۷۰۲۱۱۷۳۱ دانشگاه علوم پزشکی ابن‌سینای همدان می‌باشد. نویسندگان مقاله از معاونت تحقیقات و فن‌آوری دانشگاه سپاسگزاری می‌نمایند.

REFERENCES

1. Jeon H, Park S. Separation of fine particles with electrostatically enhanced cyclone. Separation Science and Technology. 2020;55(3):575-82.
2. Raoufi A, Shams M, Farzaneh M, Ebrahimi R. Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder. Chemical Engineering and Processing: Process

جمع‌آوری و افت فشار پردازد. همچنین به مطالعات بیشتری به‌منظور درک تأثیرگذاری تیغه‌های مارپیچ در عملکرد سیکلون نیاز است. در این مطالعه از دو طرح در لوله خروجی هوای سیکلون استفاده شد که نتایج به شرح زیر می‌باشند:

۱- نصب تیغه‌های مارپیچ هم‌جهت با جریان در دیواره داخلی لوله خروجی هوا منجر به افزایش بازده کل به میزان $7/33$ درصد شده است که می‌توان نقش آن را در هدایت بهتر جریان و کاهش انرژی جنبشی ذرات دانست.

۲- نصب تیغه‌های مارپیچ در خلاف جهت با جریان در دیواره داخلی لوله خروجی هوا منجر به افزایش $1/5$ درصدی بازده کل شده است. مانع غیر هم‌جهت بی‌شک سبب ایجاد آشفتنگی در جریان می‌گردد که برای یافتن ارتباط بین حد آشفتنگی و بازده جمع‌آوری نیاز به بررسی‌های بیشتر از قبیل تغییر در طول گام‌ها و همچنین ضخامت گام پیشنهاد می‌گردد.

۳- تیغه‌های مارپیچ جمع‌آوری ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ را بهبود می‌بخشد.

۴- به‌کارگیری تیغه‌های مارپیچ در حالت اول که جهت مارپیچ‌ها هم‌جهت با جهت چرخشی سیکلون است سبب کاهش افت فشار $(2/5-)$ و در حالت دوم که جهت مارپیچ‌ها در خلاف جهت جریان سیکلون است سبب افزایش افت فشار می‌شود $(2/3+)$.

۵- با مقایسه ضریب کیفیت سه سیکلون می‌توان به این نکته پی برد که سیکلون با تیغه‌های هم‌جهت

Intensification. 2008;47(1):128-37.

3. Fu P-B, Wang F, Yang X-J, Ma L, Cui X, Wang H-L. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM2. 5 separation. Environ Sci Technol. 2017;51(3):1587-94.
4. Mohammadi H, Golbabaei F, Farhang Dehghan S, Normohammadi M. Occupational exposure

- assessment to crystalline silica in an insulator industry: Determination the risk of mortality from silicosis and lung cancer. *Journal of Health and Safety at Work*. 2017;7(1):45-52.
5. Ghorbani shahna F, Moradi M, Bahrami A, Reza zadeh azari M. Design, Implementation & Assessment of Local Exhaust Ventilation System and dust collectors for crushing unit. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*. 2015;2(2):33-42.
 6. Wu X, Chen X. Effects of vortex finder shapes on the performance of cyclone separators. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2019.
 7. Qiang L, Qingong W, Weiwei X, Zilin Z, Konghao Z. Experimental and computational analysis of a cyclone separator with a novel vortex finder. *Powder Technol*. 2020;360:398-410.
 8. Pei B, Yang L, Dong K, Jiang Y, Du X, Wang B. The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator. *Powder Technol*. 2017;313:135-44.
 9. Elsayed K, Lacor C. The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. *Comput Fluids*. 2013;71:224-39.
 10. Wei Q, Sun G, Gao C. Numerical analysis of axial gas flow in cyclone separators with different vortex finder diameters and inlet dimensions. *Powder Technol*. 2020;369:321-33.
 11. Wasilewski M, Brar LS, Ligus G. Experimental and numerical investigation on the performance of square cyclones with different vortex finder configurations. *Sep Purif Technol*. 2020;239:116588.
 12. Xiong Z, Ji Z, Wu X. Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones. *Powder Technol*. 2014;253:644-9.
 13. Lim K, Kim H, Lee K. Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes. *J Aerosol Sci*. 2004;35(6):743-54.
 14. Jafarnezhad A, Salarian H, Kheradmand S, Khaleghinia J. Performance improvement of a cyclone separator using different shapes of vortex finder under high-temperature operating condition. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021;43(2):1-15.
 15. Ficici F, Ari V, Kapsiz M. The effects of vortex finder on the pressure drop in cyclone separators. *Int J Phys Sci*. 2010;5(6):804-13.
 16. Zhu Y, Kim M, Lee K, Park Y, Kuhlman M. Design and performance evaluation of a novel double cyclone. *Aerosol Sci Technol*. 2001;34(4):373-80.
 17. Horvath A, Jordan C, Harasek M. Influence of vortex-finder diameter on axial gas flow in simple cyclone. *Chemical product and process modeling*. 2008;3(1)..
 18. Elsayed K. Design of a novel gas cyclone vortex finder using the adjoint method. *Sep Purif Technol*. 2015;142:274-86.
 19. Avci A, Karagoz I. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *J Aerosol Sci*. 2003;34:937-55.
 20. Xu W, Li Q, Wang J, Jin Y. Performance evaluation of a new cyclone separator-Part II simulation results. *Sep Purif Technol*. 2016; 160: 112-116.
 21. Fu S, Zhou F, Sun G, Yuan H, Zhu J. Performance evaluation of industrial large-scale cyclone separator with novel vortex finder. *Adv Powder Technol*. 2021.
 22. Leshan K, Crescente F, Jillian S, Savannah J. Pressure Drop of Respirable Dust Cyclone Samplers. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2019;11(2):114-25.
 23. Farahani SMN, Tahmasbi V, Safikhani H, Abbassi A. Effects of Using Ribs on Flow Pattern and Performance of Cyclone Separators. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2011;5(2):180-7.
 24. Kim H-T, Lee K, Kuhlman M. Exploratory design modifications for enhancing cyclone performance. *J Aerosol Sci*. 2001;32(10):1135-46.

25. Hsu C-W, Huang S-H, Lin C-W, Hsiao T-C, Lin W-Y, Chen C-C. An experimental study on performance improvement of the stairmand cyclone design. *Aerosol and Air Quality Research*. 2014;14:1003-16.
26. Mahmoud M, Mike A, Bijan S. Indoor PM2.5 Concentrations in the Office, Café, and Home. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2010;2(2):57-62.
27. Javadi I, Yazdani Charati J, Mohammadyan M. Evaluation of cooking emitted particulate matter concentration and workers cancer risk assessment in the sari fast-food shops %J *Journal of Health and Safety at Work*. 2019;9(2):121-32.
28. Theodore L. *Air pollution control equipment calculations*: John Wiley & Sons; 2008.
29. Patra G, Velpuri B, Chakraborty S, Meikap B. Performance evaluation of a hydrocyclone with a spiral rib for separation of particles. *Advanced Powder Technology*. 2017;28(12):3222-32.