

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Investigation and Comparison of the Particle Collection Efficiency for Zinc Oxides (0.5-10 microns) in Cyclones and Electrostatic Precipitators with Coaxial DBDs

Mahsa Behraves^{1,2}, Rasoul Yarahmadi^{1,2*}, Alireza Alipour³

¹Air Pollution Research Center, Department of Occupational Health Engineering, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

²Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

³Department of Mechanical Engineering; Shiraz University, Shiraz, Iran.

Received: 2025/01/13

Accepted: 2026/06/16

ABSTRACT

Introduction: Rapid urbanization and industrialization have made controlling particulate matter pollution critical. Cyclones and electrostatic precipitators (ESPs) are two widely employed technologies. In this study, the efficiency, quality factor, pressure drop and energy consumption of these two systems were measured in the same dimensions and under different laboratory conditions. In addition, the energy consumption of the reinforced DBD coaxial ESP was also investigated. The aim of this study is to provide detailed information for comparing two particle collection systems with different operating conditions.

Material and Methods: Both devices were designed with the exact dimensions to investigate the collection efficiency, pressure drop, quality factor, and energy consumption. A standard Stairmand cyclone and a similarly sized ESP enhanced by coaxial DBDs were constructed. Experiments were conducted under isokinetic conditions according to the ASTM D3685 standard. Particle concentrations were measured using a Grimm 1.108 particle counter, and pressure drop was measured using a manometer. The performance of the two systems was evaluated by sampling both upstream and downstream of the cleaning devices and applying analytical formulas.

Results: A comparative analysis of cyclones and ESPs revealed that increasing temperature negatively impacted the collection efficiency of both systems. While cyclones benefited from higher particle concentrations, ESPs coaxial DBDs demonstrated optimal performance at intermediate concentrations. The study also found that increasing flow velocity significantly improved the collection efficiency of cyclones, whereas ESPs achieved their best performance at a lower, optimal velocity. However, the changes in particle collection efficiency in ESP were approximately 4-10% higher than in cyclone and have an optimum energy conception. Moreover, doubling the voltage above the corona threshold in ESPs resulted in a notable enhancement (about 16.3%). The energy consumption of the reinforced coaxial DBD ESP was measured at 12.09 J/L.

Conclusion: The results of this study indicated that ESP's quality factor was significantly higher than cyclones when operated and consumed less energy than usual ESPs under the same conditions. The maximum quality factor achieved for ESPs highlighted their superior collection efficiency, lower pressure drops, and energy consumption.

Keywords: Cyclone, Electrostatic precipitator (ESP), Collection efficiency, Pressure drop, Quality factor, Energy consumption

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Behraves M., Yarahmadi R., Alipour A. Investigation and Comparison of the Particle Collection Efficiency for Zinc Oxides (0.5-10 microns) in Cyclones and Electrostatic Precipitators with Coaxial DBDs. J Health Saf Work. 2026; 16(2): 422-447.

* Corresponding Author Email: yarahmadi.r@iums.ac.ir

Copyright © 2026 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Due to increasing urbanization and industrialization, air pollution has become a significant global concern. Particulate matter (PM), a major component of air pollution, poses serious health risks. Various control technologies, including cyclones and electrostatic precipitators (ESPs), have been developed to mitigate the impact of PM. While cyclones are simple and cost-effective, their efficiency in collecting fine particles is limited. In contrast, ESPs efficiently capture fine particles with high energy consumption. This study compares cyclones and ESPs equipped with Coaxial DBDs with the exact dimensions under varying laboratory conditions to evaluate their relative performance regarding particle collection efficiency, pressure drop, quality factor, and energy consumption. The findings of this study will provide valuable insights for selecting the most appropriate particle collection system for specific industrial applications.

2. MATERIAL AND METHODS

This section will initially describe the design and construction methods of these devices. Subsequently, the specific experimental procedures and the required instruments will be detailed.

1-Device Design: A high-efficiency cyclone model was employed in this study. The cyclone body was constructed from conductive aluminum with a uniform thickness. The body diameter was 5 cm, while other dimensions were determined based on this diameter. An aluminum cylinder with a diameter matching the cyclones was utilized for the ESP, which was enhanced by the coaxial DBDs. This cylinder was used as the anode covered by Mica DBD, with its ends connected to two cones that function as the inlet and outlet for the gas air stream. The tungsten electrode was grounded and covered by glass DBD and positioned within the middle of the cylinder to ionize incoming particles, which was used to induce corona discharge as a cathode. The length of the electrode was calculated to be 12 cm.

2- Sampling method: A full factorial design was used to determine the number of sampling repetitions. The variables included inlet particle concentration, air velocity, temperature, and applied voltage.

2-1- The Particle Collection Efficiency: The collection efficiency was determined under isokinetic conditions by ASTM D3685 using a

Grimm 1.108 particle counter and direct reading method. It was calculated as the ratio of the remaining particle to inlet particle concentrations:

$$\eta = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \times 100 \quad (1)$$

(m_{out}): The outlet particle concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

(m_{in}): The inlet particle concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2-2- Pressure drop: The pressure drop across the devices was measured directly using a Pitot tube and manometer. The difference between the two readings represents the system's pressure drop.

$$\Delta p = \Delta p_{out} - \Delta p_{in} \quad (2)$$

Δp_{out} : The pressure drops after a device (Pa)

Δp_{in} : The pressure drops before a device (Pa)

2-3- The quality factor: The quality factor, a metric used to evaluate the performance of an air cleaning device in removing suspended particles, simultaneously considers the impact of particle emission into the environment and the pressure drop across the device. It is calculated using equation 3.

$$Q_F = \frac{\ln \frac{1}{F}}{\Delta p} \quad (3)$$

Δp : The pressure drops (Pa)

P: Emission of particles into the environment (%)

2-4- Specific input energy (SIE): SIE can be used as a macroscopic parameter to describe the running of the chemical process in the ESP cylinder by which the efficiency was determined. SIE is calculated using equation 4.

$$\text{SIE} = \frac{P}{Q} \quad (4)$$

SIE: Specific input energy (J/l)

P: The discharge power (W)

Q: The gas flow rate (l/s)

3. RESULTS AND DISCUSSION

Temperature plays a crucial role in the performance of both cyclone and ESP systems (Figure 1). Maintaining lower temperatures at 20°C is essential for maximizing particle collection efficiency in these air pollution control devices to above 65%. Higher temperatures reduce gas density and increase viscosity, hindering particle

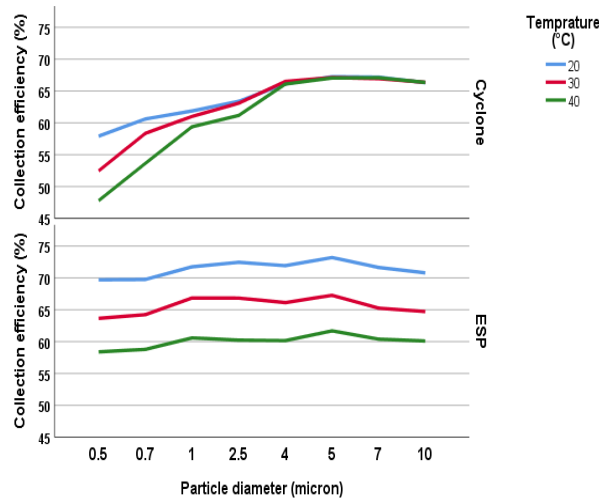


Fig. 1: The collection efficiency at various temperature

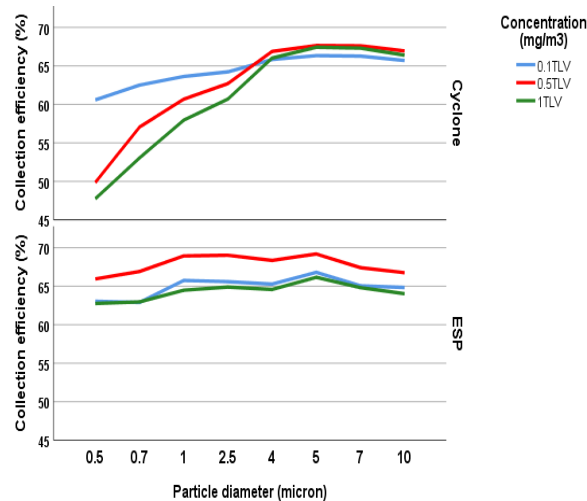


Fig. 2: The collection efficiency at various concentration

capture by centrifugal and electrical forces. Studies by A.Jafarnezhad et al. confirmed this, with temperature increases leading to notable efficiency drops.

The preceding analysis highlighted the complex interplay between inlet particle concentration and collection efficiency in cyclone and ESP systems. Increasing concentration initially enhanced cyclone efficiency (1TLV). ESP demonstrated optimal efficiency at intermediate concentrations at 0.5TLV ($P < 0.05$) (Figure 2). Qorbani et al. demonstrated a significant positive correlation between inlet particle concentration and cyclone collection efficiency ($P < 0.05$), indicating more impact with the wall and inter-particle collisions. For ESPs,

the relationship between collection efficiency and increasing concentration is inconsistent, with some studies reporting no change and others reporting a decrease.

Increasing the inlet velocity to 15 m/s significantly improved the collection efficiency of cyclones. This could be attributed to the increased centrifugal force acting on the particles, forcing them towards the cyclone walls. However, for ESPs, a decrease in inlet velocity to 5 m/s increased collection efficiency ($P < 0.05$) (Figure 3). Higher velocities in ESPs lead to increased turbulence, reducing the residence time of particles in the ionization and collection stages.

The results consistently demonstrated that

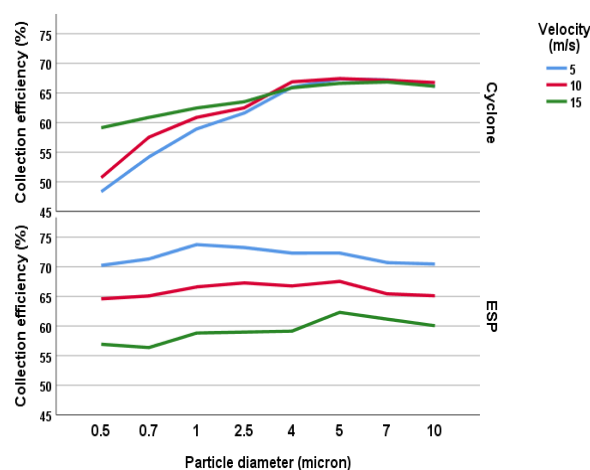


Fig. 3: The collection efficiency at various velocity

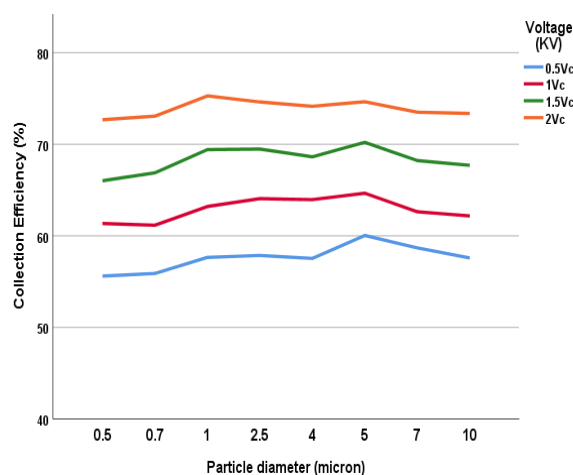


Fig. 4: The collection efficiency at various voltages

increasing the applied voltage significantly enhanced particle collection efficiency across all particle sizes ($P < 0.05$). For instance, when the applied voltage was increased from $0.5V_c$ to $2V_c$, the average collection efficiency improved by 18.36% across all particle size ranges (Figure 4).

The pressure drop in cyclones is significantly higher than that in ESPs. This is primarily due to the higher resistance to airflow in cyclones caused by the severe deflection of the flow and the centrifugal forces required for particle separation. As the inlet velocity increases, the pressure drop in cyclones increases exponentially. In contrast, ESPs, which rely on electrostatic forces to collect particles, have much lower pressure drops (Figure 5). As a result, the quality factor, a measure of system efficiency, is considerably higher in ESPs

(0.73 l/pa). Pressure drop is caused by resistance to airflow. In cyclones, this pressure drop is attributed to the sharp deflection of the airflow and the centrifugal force required for particle separation. As the inlet velocity increases, pressure drop rises exponentially due to the quadratic relationship between frictional force and velocity. According to Bernoulli's equation and fluid dynamics principles, turbulence and internal friction increase at high flow rates, further contributing to pressure drop. In contrast, ESP requires minimal airflow deflection, as electrostatic forces collect suspended particles on charged plates, resulting in lower pressure drops.

On the other hand, the results indicate that with the increase in voltage consumption in the ESP using the coaxial DBD mechanism, the intensity of the current flowing through it increases. As

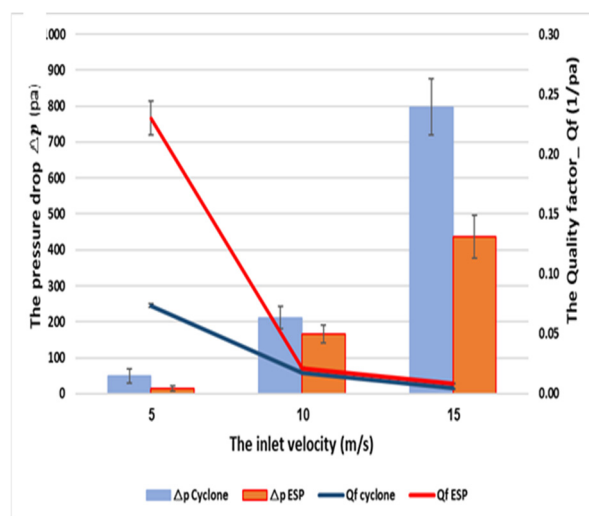


Fig. 5: The Pressure drops and Quality factor of the cyclone and ESP

Table 1: SIE in ESP Coaxial DBD

SIE (J/L)	discharge power (W)	Current (A)	Voltage (V)
0.64	6.3	0.007	900
2.19	21.6	0.012	1800
5.49	54	0.020	2700
12.09	118.8	0.033	3600

the current intensity and voltage consumption rise, the SIE in the ESP with the coaxial DBD mechanism also increases. Studies show that the SIE of the ESP under optimal testing conditions is approximately higher than the amount reported in this study with ESP using a coaxial mechanism. This study achieved efficiencies close to 70% at flow 75 lpm, with SIE between 0.64 to 12.09 (j/l) (Table 1).

4. CONCLUSIONS

This study investigates the collection efficiency of submicron zinc oxide particles (0.5-10 microns) in the cyclone and ESP under varying operational conditions. Both devices were examined under identical dimensional constraints. The SIE of ESP coaxial DBDs was calculated. The results obtained for particle collection efficiency and quality factor are summarized as follows:

- The Cyclone exhibited a significant decrease in collection efficiency for PM_{2.5} particles at elevated temperatures, with a less pronounced

reduction for larger particles. Conversely, the ESP demonstrated a more gradual decline in efficiency with increasing temperature. The reduced gas density at higher temperatures accounted for the decreased collection efficiency in both devices.

- Increased gas velocity enhanced collection efficiency in the cyclone due to the increased collision of particles with the wall and the intensified centrifugal force. In contrast, ESP achieved high collection efficiency for all particle sizes at lower velocities, owing to sufficient residence time for particle charging.

- The Cyclone displayed higher collection efficiency for lower concentrations of PM_{2.5} particles, increasing efficiency with both concentration and particle size. The ESP exhibited optimal collection efficiency for all particle sizes at 0.5TLV concentrations.

- The ESP utilizes electrostatic forces to separate particles from the gas stream. Increasing the applied voltage enhanced collection efficiency, while decreasing gas velocity improved efficiency

by increasing particle residence time in the electric field. However, excessive particle concentration reduced efficiency due to charge saturation and decreased ion density.

- The ESP demonstrated a higher quality factor, indicating better collection efficiency and fewer pressure drops, which in turn resulted in better energy consumption than usual ESPs.

- The choice between cyclones and ESPs depends on various factors, including particle size, concentration, gas velocity, spatial constraints, and operational costs. Cyclones are suitable for larger particles and high-velocity streams. In comparison, electrostatic precipitators are more efficient for smaller particles and lower-velocity streams due to their higher collection efficiency and lower pressure drop.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This article is based on some of the findings derived from the research project entitled “Evaluation of the Efficiency of Coaxial Wire-Plate Hybrid Technology in a Mini Electrocyclone” conducted at Iran University of Medical Sciences. The authors would like to express their sincere gratitude for the financial and institutional support provided for this research.

6. ETHICS CODE

This article is based on the research project entitled “Evaluation of the Efficiency of Coaxial Wire-Plate Hybrid Technology in a Mini Electrocyclone,” conducted at Iran University of Medical Sciences under ethics code IR.IUMS.REC.1401.968.

بررسی و مقایسه راندمان جمع‌آوری ذرات جامد روی اکسید با قطر ۰/۵ تا ۱۰ میکرومتر بین دو دستگاه سیکلون و رسوب دهنده الکترواستاتیک کوکسیال DBD تقویت شده

مهسا بهروش^۱، رسول یاراحمدی^{۲*}، علیرضا علی پور^۳

^۱مرکز تحقیقات آلودگی هوا، گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی محیط کار، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۲گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی محیط کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۳گروه مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۶

چکیده

مقدمه: در پی گسترش شهرنشینی و صنعتی شدن، کنترل ذرات معلق هوا اهمیت زیادی یافته است. برای این منظور از تجهیزاتی مانند سیکلون‌ها و رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی (ESP) استفاده می‌شود که هرکدام مزایا و معایبی دارند. سیکلون‌ها با طراحی ساده و هزینه کم برای ذرات درشت مناسب‌اند، درحالی‌که ESP راندمان بالایی در جمع‌آوری ذرات میکرونی دارد. در این مطالعه، راندمان، فاکتور کیفیت، افت فشار و انرژی مصرفی این دو سیستم در ابعاد یکسان و شرایط آزمایشگاهی مختلف سنجیده شد. علاوه بر آن انرژی مصرفی ESP کوکسیال DBD تقویت شده نیز بررسی شد. هدف از این مطالعه، ارائه اطلاعات دقیق برای مقایسه دو سیستم جمع‌آوری ذرات با شرایط عملیاتی مختلف است.

روش کار: در این مطالعه، برای مقایسه راندمان جمع‌آوری، افت فشار و فاکتور کیفیت دو دستگاه سیکلون و ESP با ابعاد یکسان طراحی شد. سیکلون بر اساس ابعاد استاندارد استارمند و ESP هم‌سایز آن طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM D3685 و در شرایط ایزوکینتیک انجام شد. برای سنجش غلظت ذرات از دستگاه شمارش‌گر Grimm 1.108، اندازه‌گیری افت فشار از مانومتر و محاسبه انرژی مصرفی ESP از مولتی متر استفاده شد. نمونه‌برداری در دو مرحله، در قبل و بعد از دستگاه تصفیه انجام و راندمان، افت فشار، فاکتور کیفیت و انرژی مصرفی با استفاده از فرمول‌های تحلیلی محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش دما تأثیر منفی بر راندمان جمع‌آوری ذرات در هر دو دستگاه سیکلون و ESP داشت و موجب کاهش کارایی آن‌ها گردید. در سیکلون، افزایش غلظت ذرات منجر به بهبود راندمان جمع‌آوری گردید، در حالی‌که در ESP، غلظت ذرات متوسط بیشترین راندمان را به همراه داشت. همچنین در سیکلون افزایش سرعت جریان هوا موجب افزایش قابل توجهی در راندمان شد، در حالی‌که در رسوب‌دهنده، در سرعت بهینه کمتر، بهترین راندمان مشاهده گردید ($P_value < 0.05$). راندمان جمع‌آوری ذرات در ESP تقریباً ۴-۱۰٪ بیشتر از سیکلون محاسبه شد. علاوه بر این، در ESP، افزایش ولتاژ به اندازه‌ی دو برابر برای آستانه تخلیه کرونا موجب افزایش معنادار راندمان جمع‌آوری ذرات به اندازه ۱۶/۳٪ گردید ($P_value < 0.05$). با استفاده از ESP کوکسیال DBD تقویت شده مقدار مصرف انرژی معادل ۱۲/۰۹ J/L محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که به کارگیری ساختار کوکسیال DBD در ESP امکان دستیابی هم‌زمان به راندمان بالای جداسازی ذرات و کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌کند، بدون آن‌که در بازه ۰/۵ تا ۱۰ میکرومتر افت معناداری در عملکرد ایجاد شود. مقایسه با سیکلون در شرایط یکسان نشان داد اگرچه افزایش سرعت جریان می‌تواند راندمان سیکلون را بهبود دهد، این مزیت با افزایش افت فشار و کاهش فاکتور کیفیت همراه است. در مقابل، ESP با افت فشار ناچیز، فاکتور کیفیتی حدود ۳/۱۵ برابر بیشتر ارائه داد و برتری انرژی‌محور خود را تأیید می‌نماید.

کلمات کلیدی: سیکلون، رسوب‌دهنده الکترواستاتیک کوکسیال DBD تقویت شده (ESP)، راندمان، افت فشار، فاکتور کیفیت

مقدمه

با توجه به گسترش شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، که منجر به بهبود استانداردهای زندگی شده است، افزایش چشمگیر آلاینده‌های گوناگون به عنوان پیامدهای ناگزیر این توسعه می‌باشد. در این میان، ذرات معلق به عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های صنعتی، نیازمند کنترل دقیق و مؤثر می‌باشند. ذرات معلق، ذرات جامد و مایع شناور در هوا هستند که بر اساس اندازه و ترکیب شیمیایی دسته‌بندی می‌شوند (۱). این ذرات، به تنهایی یا در ترکیب با سایر آلاینده‌ها، تهدید جدی برای سلامت انسان به شمار می‌روند و در مطالعات اپیدمیولوژیک و سم‌شناسی متعددی، اثرات مخرّب آن‌ها بر سلامت، از جمله بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی، افزایش مرگ‌ومیر، مسمومیت سیستم عصبی و پیامدهای نامطلوب در بارداری، به اثبات رسیده است (۲).

برای کنترل انتشار این ذرات، روش‌ها و تجهیزات گوناگونی از جمله اتاقک‌های ته‌نشینی، سیکلون‌ها، فیلترهای کیسه‌ای، اسکرابرهای تر و رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی^۱ (ESP) به کار گرفته می‌شوند (۳). سیکلون‌ها، به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین تجهیزات جداسازی ذرات، با استفاده از نیروی گریز از مرکز، ذرات جامد و مایع را از جریان گاز جدا می‌کنند و اغلب به عنوان پیش‌تصفیه در کنار سایر سیستم‌های تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرند (۴، ۵). این تجهیزات به دلیل ساختار نسبتاً ساده، هزینه اولیه و عملیاتی کم و تطبیق‌پذیری در انواع صنایع، گزینه‌ای مطلوب محسوب می‌شوند. سیکلون‌ها معمولاً در شرایط بهینه، بازدهی متوسط تا زیاد برای ذرات بزرگتر از حدود ۵ میکرومتر ارائه می‌دهند و قابلیت کار در غلظت‌های بالای گرد و غبار را دارند (۶).

با این حال، در مطالعه T.Dziubak و همکاران در سال ۲۰۲۰ نشان داده شده است که سیکلون‌های سنتی در جمع‌آوری ذرات PM_{2.5} با چالش‌هایی مواجه هستند و

در این موارد، استفاده از ESP می‌تواند تا ۱۲٪ راندمان جمع‌آوری را بهبود بخشد. البته افزایش سرعت ورودی می‌تواند باعث کاهش راندمان ESP شود و محدودیت‌هایی را در عملکرد آن‌ها ایجاد کند (۷). در حالی که راندمان ESP نسبت به سیکلون‌ها برای جمع‌آوری گرد و غبار در ذرات زیرمیکرونی مناسب‌تر است، می‌توان با تغییر در طراحی در سیکلون به طور قابل توجهی راندمان آن را بهبود بخشید (۷). برای مثال در مطالعه H.Erol و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی پارامترهای طراحی سیکلون مانند قطر ورتکس فایندر، قطر بدنه، سرعت ورودی و اندازه ذرات، می‌توان عملکرد سیکلون را بهبود بخشید. سیکلون‌هایی با قطر ورتکس فایندر کوچکتر از سیکلون استایرمنند، در جمع‌آوری ذرات کوچکتر از ۷ میکرومتر، عملکرد بهتری دارند. علاوه بر آن قطر برش ۵۰ درصد با کاهش قطر ورتکس فایندر کاهش یافت که نشان دهنده بهبود راندمان می‌باشد. راندمان جمع‌آوری با افزایش سرعت ورودی و اندازه ذرات افزایش یافت. همچنین مشاهده شد که راندمان جمع‌آوری با کاهش هر دو قطر ورتکس فایندر و بدنه سیکلون افزایش یافت (۸).

ESP نیز به عنوان یکی دیگر از روش‌های مؤثر کنترل آلودگی هوا در صنایع مختلف شناخته می‌شود. این دستگاه‌ها در مقایسه با سایر روش‌های تصفیه، راندمان بالایی در جمع‌آوری ذرات بسیار ریز، افت فشار کم و هزینه‌های عملیاتی کم دارند (۳). در مطالعه M.Kilic در سال ۲۰۲۲ تأثیر پارامترهای گوناگون بر عملکرد ESP برای محدوده قطر ذرات ۰/۰۲ تا ۱۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه تغییر ولتاژ تغذیه، قطر سیم‌های باردار کننده، فاصله بین الکترودهای باردار کننده و جمع‌آوری کننده و سرعت ورودی سیال، تأثیر قابل توجهی بر بار الکتریکی ذرات و بازدهی جمع‌آوری داشت (۹).

کنترل آلودگی ذرات معلق در صنایع مختلف، به عنوان یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و بهداشتی مطرح است. انتخاب مناسب‌ترین سیستم جمع‌آوری ذرات

1. Electrostatic precipitator
2. Particle matter

انتخاب و طراحی بهینه سیستم‌های جمع‌آوری ذرات با تمرکز بر بهره‌وری انرژی در صنایع مختلف و تحت شرایط عملیاتی متفاوت فراهم آورد.

روش کار

باتوجه به اهداف این مطالعه، در این قسمت ابتدا روش‌های طراحی و ساخت دستگاه‌ها تشریح می‌شود. پس از آن نحوه انجام آزمایش‌های تخصصی و ابزارهای مورد نیاز به طور کامل بیان می‌گردد.

طراحی سیکلون

با توجه به هدف مطالعه برای جمع‌آوری ذرات با سمیت بالا در محیط‌های بسته (اجتماعی، شغلی، صنعتی، اداری و غیره)، سیکلون از نوع راندمان بالا استفاده شد (۱۰). بدنه سیکلون از جنس آلومینیوم هادی جریان برق انتخاب شد. ضخامت آن در کل بدنه یکسان بود. مشخصات آن در شکل و جدول ۱ می‌باشد (۱۱).

طراحی رسوب‌دهنده الکترواستاتیک کواکسیال DBD

برای طراحی ESP از سیلندر آلومینیومی به اندازه قطر بدنه سیکلون استفاده شد. بدنه‌ی سیلندر به عنوان الکترود آند انتخاب و ابتدای آن با ورق آلومینیومی مخروطی شکل به محفظه غلظت ساز و انتهای آن نیز به همان صورت به فن متصل شد. بر روی این بدنه عایق الکتریکی میکا نصب شد. برای ایجاد پتانسیل صفر، الکترود آند به سیستم ارت متصل شد. از سوی دیگر برای ایجاد تخلیه کرونا، الکترود تنگستن به عنوان الکترود کاتد، بدون تماس با بدنه سیلندر در داخل آن قرار گرفت و برای باردار کردن ذرات موجود در هوای ورودی به منبع ولتاژ بالا متصل شد. الکترود آند برای تخلیه الکتریکی یکنواخت در داخل عایق شیشه‌ای به ضخامت یک میلی متر قرار گرفت (۱۲). مشخصات آن در شکل و جدول ۲ می‌باشد.

در این مطالعه از روی اکسید که دارای خواص فیزیکی و شیمیایی مشابه با ذرات با ریسک سمیت و مخاطرات بالا می‌باشد استفاده شده است. ذرات آن خنثی بوده و

در این زمینه، مستلزم بررسی دقیق عملکرد و کارایی گزینه‌های مختلف می‌باشد. سیکلون‌ها و ESP از جمله رایج‌ترین سیستم‌های جمع‌آوری ذرات هستند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود می‌باشند. سیکلون‌ها به دلیل سادگی ساختار و هزینه عملیاتی پایین، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ در حالی که ESPها به دلیل راندمان بالای جداسازی ذرات ریز، به ویژه در صنایع با استانداردهای کیفی بالا، مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، در راندمان‌های بالا، مصرف انرژی در ESPها بالا می‌باشد و به عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی این سیستم‌ها شناخته شده است. در این مطالعه، با هدف کاهش مصرف انرژی همراه با حفظ راندمان بالای جداسازی ذرات، یک سیستم رسوب‌دهنده الکترواستاتیک مبتنی بر مکانیسم تخلیه دی‌الکتریک با مکانیسم کواکسیال^۱ DBD طراحی و بررسی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش، به کارگیری یک لایه عایق الکتریکی در بدنه سیلندری ESP است که با اصلاح توزیع میدان الکتریکی و امکان ذخیره‌سازی جزئی انرژی الکتریکی، منجر به کاهش توان مصرفی سیستم در مقایسه با ساختارهای متداول ESP گزارش شده در مطالعات پیشین می‌شود؛ در حالی که راندمان جداسازی در سطح مطلوب حفظ می‌گردد. به منظور انجام یک مقایسه منصفانه و مبتنی بر اصول فیزیکی، عملکرد ESP طراحی شده با یک سیکلون متعارف که از نظر ابعاد هندسی و پارامترهای دیمانسیونی کاملاً یکسان طراحی شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا، تأثیر شرایط عملیاتی مختلف شامل دمای گاز، سرعت جریان، غلظت ذرات ورودی و ولتاژ اعمالی بر عملکرد هر دو سیستم به صورت جامع بررسی شده است. شاخص‌های عملکردی شامل راندمان جداسازی ذرات، مصرف انرژی، فاکتور کیفیت سیستم‌های تهویه و افت فشار به عنوان معیارهای ارزیابی انتخاب شده‌اند تا تحلیل هم‌زمان رفتار الکتریکی و هیدرودینامیکی سیستم‌ها امکان‌پذیر شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای علمی معتبری برای

1. Coaxial dielectric barrier discharge

جدول ۱: مشخصات سیکلون استارمند

ابعاد (cm)	مشخصات سیکلون استارمند
5	قطر بدنه سیکلون (Dc^1)
۲/۵	قطر ورتکس فایندر (Dv^2)
۱/۸۷۵	قطر تخلیه هاپر (Dh^3)
۷/۵	ارتفاع بدنه سیکلون (Lc^4)
۱۲/۵	ارتفاع بدنه هاپر (Lh^5)
۲/۵	ارتفاع ورودی سیکلون (H^6)
1	پهنا ورودی سیکلون (W^7)
۲/۵	حداکثر ارتفاع ایجادکننده گرداب (Lv^8)

¹ Diameter of cyclone body

² Diameter of Vortex finder body

³ Diameter of Hopper body

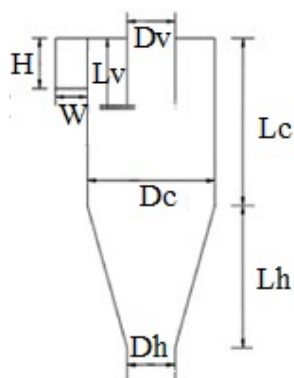
⁴ Length of cyclone body

⁵ Length of hopper body

⁶ Height

⁷ Wide

⁸ Maximum length of vortex finder



شکل ۱: سیکلون استارمند

مواد و روش نمونه برداری

برای تعیین تعداد مراحل نمونه برداری برای متغیرها از روش فاکتوریل کامل^۲ استفاده شد. متغیر پاسخ راندمان جمع آوری و افت فشار می باشد که برای سنجش آن نمونه برداری از آلاینده ها در دو مرحله قبل و بعد از دستگاه انجام شد و برای افزایش دقت، آزمایش در ۳ مرتبه تکرارپذیری انجام گرفت. برای متغیرهای غلظت

دارای شباهت در دانسیته و رفتار مکاترونیک با ذرات خنثی می باشد (۱۳). ذرات با الک ۱۰ میکرومتر جدا شد و برای جلوگیری از کلوخه شدن در دسیکاتور قرار گرفت. براساس حدود مجاز شغلی ایران مقدار TLV^۱ برای ذرات مورد آزمایش برابر ۱۰۰۰۰ میکروگرم بر مترمکعب می باشد (۱۴). نمونه ست آپ آزمایش مطابق شکل ۳ می باشد:

2. Full factorial

1. Threshold limit value

جدول ۲: مشخصات رسوب دهنده ی الکترواستاتیک

مشخصات بخش الکتریکی	ابعاد (cm)
قطر بدنه سیلندر (Dc^1)	۵
ارتفاع بدنه سیلندر (Hc^2)	۷/۵
ارتفاع مخروط ($Hcone^3$)	۱۲/۵
ضخامت عایق مورد استفاده در بدنه سیلندر ($T-DBD^4$)	۰/۲
طول کاتد بخشی الکتریکی ($Hcathode^5$)	۱۲
فاصله الکتروود تا بدنه سیلندر (GD^6)	۲

¹ Diameter of cylinder body

² Height of cylinder body

³ Height of cone

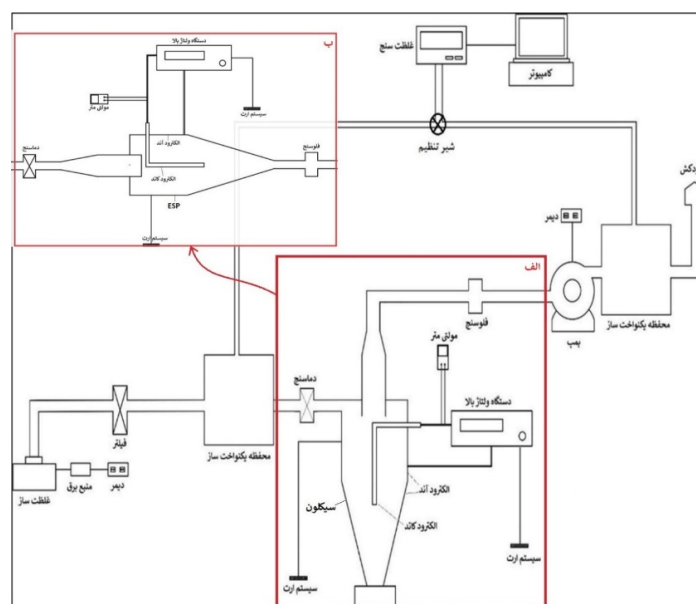
⁴ Thickness of dielectric barrier

⁵ Height of cathode

⁶ Gap discharge



شکل ۲: رسوب دهنده الکترواستاتیک



شکل ۳: دیاگرام ستاپ آزمایش تجربی شکل (الف) زمانی که سیکلون به ستاپ آزمایشگاه متصل است. شکل (ب) زمانی که ESP به ستاپ آزمایشگاه متصل است

$$\Delta p^r = \text{افت فشار (Pa)}$$

Δp_{out} : مقدار افت فشار بعد از دستگاه تصفیه (Pa)
 Δp_{in} : مقدار افت فشار قبل از دستگاه تصفیه (Pa)
 فاکتور کیفیت که معیاری برای سنجش کارایی یک دستگاه تصفیه در حذف ذرات معلق از هوا می باشد به طور هم زمان تأثیر انتشار ذرات به محیط و افت فشار در دستگاه تصفیه را بررسی می کند. با استفاده از نرخ انتشار ذرات به محیط و افت فشار دستگاه، مقدار فاکتور کیفیت به صورت رابطه ۳ محاسبه می شود (۱۸):

$$Q_F = \frac{\ln \frac{P}{\Delta p}}{\Delta p} \quad (3)$$

$$Q_F^4 = \text{فاکتور کیفیت } \left(\frac{1}{Pa}\right)$$

Δp : تغییرات افت فشار در قبل و بعد از دستگاه تصفیه
 P : انتشار ذرات به محیط که برابر است با (راندمان جمع آوری ذرات - ۱۰۰٪)

نحوه محاسبه انرژی مصرفی

یکی از مهم ترین مسائل در کاربرد سیستم های تصفیه برای اهداف کنترل ذرات معلق، حداقل مصرف انرژی نسبت به فناوری های رقیب است. بنابراین، انرژی مصرفی یک پارامتر مهم در برآورد مصرف انرژی است. در این مطالعه مقدار ولتاژ و شدت جریان با استفاده از مولتی متر زیگلر ساخت کشور آلمان سه مرتبه قرائت شد و با محاسبه توان مصرفی و فرمول زیر مقدار انرژی مصرفی محاسبه شد (۱۹):

$$SIE = \frac{P}{Q} \quad (4)$$

SIE^5 : انرژی مصرفی دستگاه تصفیه (J/L)

P : توان مصرفی دستگاه تصفیه (W)

Q : هواگذر جریان های دستگاه تصفیه (lps)

3. Pressure drop
4. Quality factor
5. Specific input energy

ذرات ورودی (0.1TLV، 0.5TLV و 1TLV)، سرعت ورودی (۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه) و دمای جریان هوای ورودی (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد) سه سطح، ولتاژ مصرفی (0.5Vc، 1Vc، 1.5Vc و 2Vc) چهار سطح و قطر آئرو دینامیکی ذرات (۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲/۵، ۴، ۵، ۷ و ۱۰ میکرومتر) ۸ سطح در نظر گرفته شد. کلیه آزمایش ها در فشار و رطوبت ثابت و آزمایشگاهی انجام شد (۱۵).

نحوه محاسبه راندمان جمع آوری

نمونه برداری و تعیین راندمان تجهیزات کنترل ذرات در شرایط ایزو کینتیک در دستگاه تصفیه مطابق با شرایط استاندارد ASTM D3685 و به وسیله ی دستگاه شمارشگر ذرات Grimm 1.108 ساخت کشور آلمان ۱۵ کاناله با قابلیت شمارش از سایز ۰/۳ الی ۲۰ میکرومتر، به روش قرائت مستقیم انجام شد. برای کاهش خطای آزمایشگاهی آزمایش ها با سه بار تکرار انجام شد و دستگاه ها کالیبره شدند (۱۶). برای محاسبه راندمان جمع آوری ذرات از رابطه ۱ استفاده شد (۱۷):

$$\eta = \frac{m_{in}}{m_{out}} \times 100$$

η^2 : راندمان جمع آوری ذرات (٪)

m_{out} : غلظت ذرات خروجی از دستگاه تصفیه (mg/m^3)

m_{in} : غلظت ذرات ورودی به دستگاه تصفیه (mg/m^3)

نحوه محاسبه افت فشار و فاکتور کیفیت

بعد از مشخص شدن راندمان جمع آوری ذرات، افت فشار دستگاه قبل و بعد از الکتروسیکلون با استفاده از پیتوت تیوب و مانومتر شرکت KIMO مدل KX 404 ساخت کشور فرانسه به صورت مستقیم قرائت و مقدار نهایی آن با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$\Delta p = \Delta p_{out} - \Delta p_{in} \quad (2)$$

1. Corona discharge threshold voltage
2. Efficiency

یافته‌ها

این مطالعه به صورت تجربی در آزمایشگاه تهویه مرکز کنترل آلودگی هوا انجام شد. در این مطالعه غلظت ذرات ورودی به دستگاه تصفیه و سپس غلظت ذرات جمع‌آوری شده در هوای خروجی از دستگاه تصفیه با استفاده از دستگاه Grimm 1.108 سنجیده شد و با استفاده از رابطه ۱، درصد راندمان جمع‌آوری محاسبه شد. توزیع درصد راندمان هر دستگاه به تفکیک مطابق جدول ۳ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد توزیع راندمان سیکلون بین ۳۰ تا ۷۰ درصد می‌باشد که بیشترین راندمان جمع‌آوری ذرات در بازه‌ی ۶۰ تا ۷۰ درصد اندازه‌گیری شد. از سوی دیگر راندمان جمع‌آوری برای ESP بین ۴۰ الی ۸۰ درصد می‌باشد و توزیع آن تقریباً در بین درصدها برابر مشاهده شد. آمار توصیفی مقادیر راندمان جمع‌آوری برای دو دستگاه به صورت جدول ۳ می‌باشد.

بررسی میانگین راندمان دو دستگاه در دماهای مختلف

در طرح آزمایش برای بررسی تاثیر دما بر راندمان جمع‌آوری ذرات در دو دستگاه تصفیه در سه سطح آزمایش انجام شد (شکل ۴). در سیکلون راندمان جمع‌آوری از حدود ۴۵٪ برای ذرات ریز و تا ۶۵٪ برای ذرات PM_{2.5} می‌رسد. در دمای ۴۰ درجه، راندمان در ابتدا کمتر است اما با افزایش اندازه ذرات به بیش از ۲/۵ میکرومتر، راندمان در هر سه دما به محدوده مشابهی (بین ۶۰٪ تا ۷۰٪) می‌رسد. با افزایش اندازه ذرات، راندمان جمع‌آوری در هر سه دما افزایش می‌یابد و نسبت به هم همگرایی پیدا می‌نماید. برای بررسی سطح معناداری تاثیر دما بر راندمان جمع‌آوری ذرات آزمون کروسکال والیس^۱ در سه سطح دما انجام شد. مقدار P-value برای تمامی دماها برابر با ۰/۳۵۶ است که نشان‌دهنده عدم وجود رابطه قوی بین دما و راندمان جمع‌آوری در سیکلون است. این بدان معناست که تفاوت‌های مشاهده شده در راندمان جمع‌آوری ذرات ممکن است ناشی از تصادف باشد و نمی‌توان نتیجه‌گیری قطعی در مورد تاثیر دما بر راندمان

1. The kruskal-wallis test

داشت. در ESP محدوده راندمان بین ۵۵٪ تا ۷۵٪ برای تمام اندازه‌های ذرات باقی می‌ماند. به طور کلی راندمان جمع‌آوری در ESP نسبت به سیکلون کمتر متغیر بوده و کمتر تحت تاثیر اندازه ذرات قرار می‌گیرد. در این قسمت نیز با کاهش دما راندمان جمع‌آوری افزایش می‌یابد (شکل ۴). برای بررسی سطح معناداری تاثیر دما بر راندمان جمع‌آوری ذرات آزمون یک طرفه آنوا^۲ در سه سطح دما انجام شد. مقدار P-value کمتر از ۰/۰۰۱ به دست آمد که نشان دهنده معناداری دماها می‌باشد. سپس با استفاده از پس‌آزمون^۳ توکی^۴ برای شناسایی دقیق‌تر اینکه کدام دماها با یکدیگر تفاوت دارند استفاده شد. نتایج آن مطابق جدول ۴ می‌باشد.

در جدول ۴ مقایسه دماهای ۲۰ و ۳۰ درجه نشان می‌دهد که میانگین راندمان جمع‌آوری ذرات در دماهای ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به طور معناداری متفاوت است ($P_value < 0.001$). به عبارت دیگر، راندمان در دما ۲۰ درجه به طور متوسط حدود ۵/۷۸ درصد بیشتر از دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد است.

مقایسه دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین راندمان در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد است ($P_value < 0.001$). به طوری که راندمان در دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد به طور متوسط حدود ۱۱/۳۶ درصد بیشتر از دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد است.

مقایسه دماهای ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین راندمان در دماهای ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد است ($P_value < 0.001$). به طوری که راندمان در دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد به طور متوسط حدود ۵/۵۷ درصد بیشتر از دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد است.

بررسی میانگین راندمان دو دستگاه در غلظت های ورودی مختلف

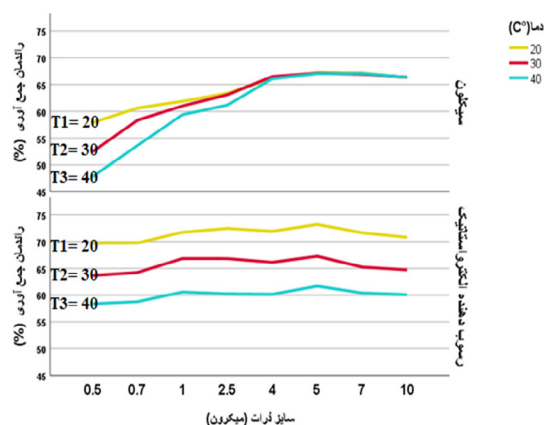
در طرح آزمایش برای بررسی تاثیر غلظت ذرات ورودی بر راندمان جمع‌آوری ذرات در دو دستگاه تصفیه

2. One way ANOVA sample test

3. Post hoc

4. Tukey

راندان جمع آوری سیکلون										غلظت ذرات (۳mg/m)		سرعت ورودی (m/s)		دمای (°C)	
راندان جمع آوری ESP با مکانیسم کوآسیال DBD					راندان جمع آوری سیکلون					غلظت ذرات (۳mg/m)		سرعت ورودی (m/s)		دمای (°C)	
انحراف معیار (°)	میگنیتن (°)	ماکسیم (°)	مینیم (°)	انحراف معیار (°)	میگنیتن (°)	ماکسیم (°)	مینیم (°)	انحراف معیار (°)	میگنیتن (°)	ماکسیم (°)	مینیم (°)	سرعت ورودی (m/s)	غلظت ذرات (۳mg/m)	سرعت ورودی (m/s)	دمای (°C)
1/67	77/26	79/41	74/21	3/03	65/63	67/96	59/15					5			20
1/57	70/20	71/83	67/82	2/54	65/11	67/11	59/54					10	0.1TLV		
3/39	62/53	67/65	58/32	1/17	64/14	65/03	62/27					15			
2/44	78/12	81/65	75/40	4/79	62/07	67/48	56/54					5	0.5TLV		
1/16	74/15	75/66	72/44	4/54	62/82	67/39	55/35					10			
1/68	66/61	68/32	63/89	2/86	65/49	67/90	59/62					15			30
0/90	74/28	75/55	72/88	7/35	59/26	67/15	50/83					5	1TLV		
1/18	72/02	74/32	70/49	4/28	63/97	67/73	56/43					10			
2/12	67/42	70/42	64/63	2/67	65/95	68/01	60/51					15			
1/58	78/93	81/70	77/45	3/07	64/59	67/34	59/42					5	0.1TLV		
1/73	66/24	67/94	63/91	2/60	64/59	66/97	60/22					10			40
2/07	57/14	60/54	53/80	0/80	64/03	65/23	62/93					15	0.5TLV		
2/36	70/97	74/61	68/47	7/65	60/77	67/74	49/30					5			
0/64	67/61	69/09	67/01	12/47	61/68	67/89	31/35					10	1TLV		
1/47	61/29	63/37	58/97	2/89	65/30	67/91	60/34					15			
0/99	67/11	69/01	66/03	10/54	60/40	67/79	37/58					5			40
2/15	63/03	66/01	59/16	5/20	61/84	66/79	53/37					10	0.1TLV		
2/09	58/21	61/41	55/69	5/28	61/35	67/11	54/25					15			
2/11	64/30	67/52	61/75	2/66	63/30	66/23	59/09					5	0.1TLV		
1/12	58/99	60/27	57/58	2/86	64/39	67/31	59/76					10			
4/11	48/56	54/56	44/36	1/27	63/68	65/52	62/38					15			40
1/32	68/54	71/05	66/92	13/07	57/97	67/59	31/86					5	0.5TLV		
1/19	64/60	65/89	62/25	9/45	60/08	67/80	41/58					10			
1/81	58/43	60/86	56/04	2/31	65/58	67/75	61/79					15	1TLV		
1/13	66/62	67/87	65/10	13/14	56/93	67/15	30/24					5			
1/55	57/56	59/73	55/45	11/95	57/79	68/00	38/83					10			40
1/99	52/75	56/06	49/63	8/89	59/88	67/76	44/10					15			



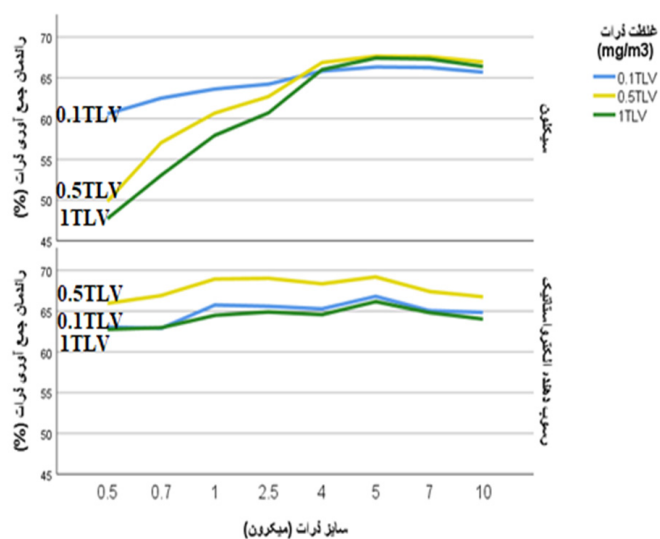
شکل ۴: تاثیر دمای جریان ورودی بر راندمان جمع آوری سیکلون و ESP با مکانیسم کواکسیال DBD

جدول ۴: نتایج آزمون تعقیبی توکی برای سطوح مختلف دما در بخش ESP

دما ۱ (°C)	دما ۲ (°C)	تعداد نمونه ها	میانگین اختلاف راندمان در دو گروه (%)	خطای استاندارد دو گروه (%)	Sig	کمینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)	بیشینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)
۲۰	۳۰	۱۸	۵/۷۸	۰/۷۶۳	<۰/۰۰۱	۳/۹۹	۷/۵۷
	۴۰	۱۸	۱۱/۳۶	۰/۷۶۳	<۰/۰۰۱	۹/۵۶	۱۳/۱۵
۳۰	۲۰	۱۸	-۵/۷۸	۰/۷۶۳	<۰/۰۰۱	-۷/۵۷	-۳/۹۹
	۴۰	۱۸	۵/۵۷	۰/۷۶۳	<۰/۰۰۱	۳/۷۸	۷/۳۶
۴۰	۲۰	۱۸	-۱۱/۳۶	۰/۷۶۳	<۰/۰۰۱	-۱۳/۱۵	-۹/۵۶
	۳۰	۱۸	-۵/۵۷	۰/۷۶۳	<۰/۰۰۱	-۷/۳۶	-۳/۷۸

در سه سطح آزمایش انجام شد (شکل ۵). در سیکلون با افزایش سایز ذرات راندمان جمع آوری افزایش می یابد. با کاهش سطوح غلظت در ذرات PM2.5، راندمان جمع آوری در سیکلون افزایش می یابد. در حالی که با افزایش سایز ذرات، راندمان جمع آوری با افزایش غلظت بار ذرات ورودی افزایش می یابد. مقدار P-value برای تمامی غلظت ها برابر با ۰/۳۵۱ است که نشان دهنده عدم وجود رابطه قوی بین بار ذرات و راندمان جمع آوری در سیکلون است. در ESP راندمان جمع آوری رسوب دهنده نسبت به تغییر سایز ذرات تغییراتی ندارد. تغییرات راندمان در ESP با افزایش غلظت ذرات افزایش می یابد؛ با این حال راندمان در غلظت های بالاتر (1TLV) اندکی

کمتر از سطوح غلظت کمتر (0.1TLV) است (شکل ۵). مقدار P-value برابر با ۰/۰۰۱ است که نشان دهنده وجود تفاوت های معنادار بین میانگین های گروه های مختلف است. با پس آزمون توکی سطوح غلظت ذرات ورودی که با یکدیگر تفاوت دارند مطابق جدول ۵ می باشد. مقایسه مختلف بین غلظت های 0.1TLV و 0.5TLV نشان می دهد که غلظت 0.5TLV به طور معناداری از 0.1TLV بالاتر است (P-value<0.001). در مقایسه بین غلظت های 0.1TLV و 1TLV هیچ تفاوت معناداری بین این دو غلظت مشاهده نشده است (P-value=0.78). در مقایسه بین غلظت های 0.5TLV و 1TLV نشان داده شده است که غلظت 1TLV به طور معناداری از



شکل ۵: تاثیر غلظت ذرات ورودی بر راندمان جمع آوری سیکلون و ESP با مکانیسم کوآسیال DBD

جدول ۵: نتایج آزمون تعقیبی توکی برای سطوح مختلف غلظت ذرات ورودی در بخش ESP

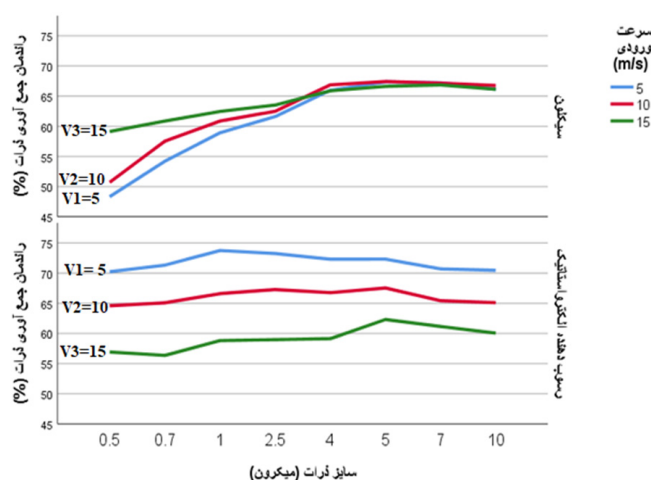
غلظت ذرات ورودی ۱ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	غلظت ذرات ورودی ۲ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	تعداد نمونه ها	میانگین اختلاف راندمان در دو گروه (%)	خطای استاندارد دو گروه (%)	Sig	کمینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)	بیشینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)
0.1TLV	0.5TLV	۱۸	۲/۹	۰/۸۵	<۰/۰۰۱	۴/۸۹	۰/۹۲
	1TLV	۱۸	۰/۵۷	۰/۸۵	۰/۷۸	۱/۴۲	۲/۵۶
0.5TLV	0.1TLV	۱۸	۲/۹	۰/۸۵	<۰/۰۰۱	۰/۹۲	۴/۸۹
	1TLV	۱۸	۳/۴۷	۰/۸۵	<۰/۰۰۱	۱/۴۹	۵/۴۷
1TLV	0.1TLV	۱۸	۰/۵۷	۰/۸۵	۰/۷۸	۲/۵۶	۱/۴۲
	0.5TLV	۱۸	۳/۴۷	۰/۸۵	<۰/۰۰۱	۵/۴۷	۱/۴۹

افزایش قطر ذرات، راندمان جمع آوری در هر سه سرعت ورودی افزایش پیدا می کند. به طوری که در قطر ذرات $\text{PM}_{2.5}$ راندمان جمع آوری تقریباً کمتر از ۶۰ درصد متغیر است؛ اما در قطرهای بالاتر از آن به بیش از ۶۵ درصد می رسد. با افزایش سرعت ورودی از ۵ به ۱۵ متر بر ثانیه، راندمان جمع آوری افزایش می یابد که نشان می دهد سرعت های بالا برای جداسازی ذرات مؤثر می باشد. مقدار P_value برای تمامی سرعت ها برابر با ۰/۳۹۸ است که نشان دهنده عدم وجود رابطه قوی بین سرعت ورودی و راندمان جمع آوری در سیکلون است. در ESP نیز راندمان

0.5TLV پایین تر است. در کل غلظت های 0.5TLV به طور معناداری بالاتر از غلظت های 0.1TLV و 1TLV می باشد و با دیگر سطوح دارای تفاوت معنی دار هستند، در حالی که بین سطوح دیگر تفاوتی مشاهده نمی شود.

بررسی میانگین راندمان دو دستگاه در سرعت های ورودی مختلف

در طرح آزمایش برای بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی بر راندمان جمع آوری ذرات در دو دستگاه تصفیه، سه سطح آزمایش انجام شد (شکل ۶). در سیکلون با



شکل ۶: تاثیر سرعت ورودی بر راندمان جمع آوری سیکلون و ESP با مکانیسم کوکسیال DBD

جدول ۶: نتایج آزمون تعقیبی توکی برای سطوح مختلف سرعت های ورودی در بخش ESP

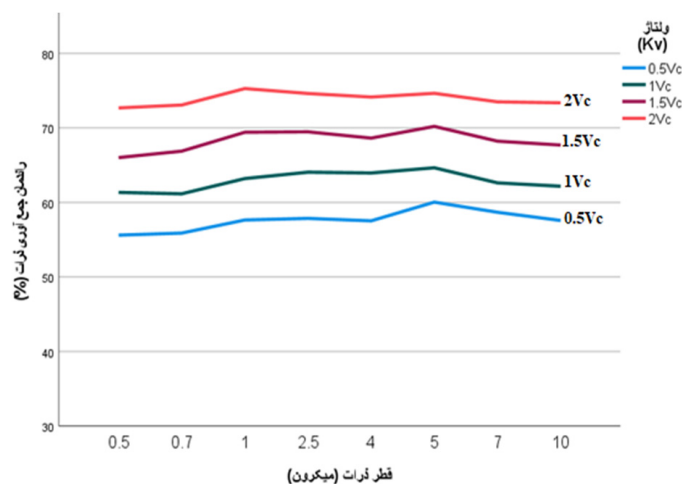
سرعت ورودی جریان هوا ۱ (m/s)	سرعت ورودی جریان هوا ۲ (m/s)	تعداد نمونه ها	میانگین اختلاف راندمان در دو گروه (%)	خطای استاندارد دو گروه (%)	Sig	کمینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)	بیشینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)
۵	۱۰	۱۸	۵/۷۴	۰/۷۴	<۰/۰۰۱	۴/۰۱	۷/۴۸
	۱۵	۱۸	۱۲/۵۷	۰/۷۴	<۰/۰۰۱	۱۰/۸۴	۱۴/۳۱
۱۰	۵	۱۸	-۵/۷۴	۰/۷۴	<۰/۰۰۱	-۷/۴۸	-۴/۰۱
	۱۵	۱۸	۶/۸۳	۰/۷۴	<۰/۰۰۱	۵/۰۹	۸/۵۷
۱۵	۵	۱۸	۱۲/۵۷	۰/۷۴	<۰/۰۰۱	-۱۴/۳۱	-۱۰/۸۴
	۱۰	۱۸	-۶/۸۳	۰/۷۴	<۰/۰۰۱	-۸/۵۷	-۵/۰۹

مقایسه سرعت ۵ و ۱۵ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که سرعت ۵ متر بر ثانیه نسبت به سرعت ۱۵ متر بر ثانیه بالاتر است و این تفاوت نیز از نظر آماری معنی‌دار است ($P_value < 0.001$). مقایسه سرعت ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به طور معناداری بالاتر از سرعت ۱۵ متر بر ثانیه است و این تفاوت نیز از نظر آماری معنی‌دار است ($P_value < 0.001$) (جدول ۶).

بررسی میانگین راندمان رسوب دهنده الکترواستاتیک در ولتاژهای مصرفی مختلف
برای بررسی تاثیر بهینه ولتاژ مصرفی در راندمان جمع آوری

با افزایش قطر ذرات اندکی افزایش می‌یابد، ولی این افزایش نسبت به سیکلون کمتر است. افزایش سرعت ورودی در این دستگاه تأثیر کمتری بر راندمان دارد؛ به طوری که، افزایش سرعت باعث کاهش راندمان می‌شود (شکل ۶). مقدار P_value برای همه سرعت‌ها کمتر از ۰/۰۰۱ است که نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاوت‌هاست. با استفاده از پس‌آزمون توکی این تفاوت‌ها مطابق جدول ۶ بررسی شد.

مقایسه سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که سرعت ۵ متر بر ثانیه به طور معناداری بالاتر از سرعت ۱۰ متر بر ثانیه است. مقدار P_value کمتر از ۰/۰۰۱ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن این تفاوت است.



شکل ۷: تاثیر ولتاژ مصرفی بر راندمان جمع آوری ESP با مکانیسم کوکسیال DBD

جدول ۷: نتایج آزمون تعقیبی توکی برای سطوح مختلف ولتاژ مصرفی در بخش ESP

ولتاژ مصرفی ۱ (kv)	ولتاژ مصرفی ۲ (kv)	تعداد نمونه ها	میانگین اختلاف راندمان در دو گروه (%)	خطای استاندارد دو گروه (%)	Sig	کمینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)	پیشینه اختلاف میانگین راندمان در دو گروه (%)
0.5Vc	1Vc	۹	-۵/۲۹	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	-۷/۳۴	-۳/۲۴
	1.5Vc	۹	-۱۰/۷۱	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	-۱۲/۷۶	-۸/۶۶
	2Vc	۹	-۱۶/۳	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	-۱۸/۳۶	-۱۴/۲۶
1Vc	0.5Vc	۹	۵/۲۹	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	۳/۲۴	۷/۳۴
	1.5Vc	۹	-۵/۴۲	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	-۷/۴۷	-۳/۳۷
	2Vc	۹	-۱۱/۰۱	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	-۱۳/۰۶	-۸/۹۷
1.5Vc	0.5Vc	۹	۱۰/۷۱	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	۸/۶۶	۱۲/۷۶
	1Vc	۹	۵/۴۲	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	۳/۳۷	۷/۴۷
	2Vc	۹	-۵/۵۹	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	-۷/۶۴	-۳/۵۴
2Vc	0.5Vc	۹	۱۶/۳	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	۱۴/۲۶	۱۸/۳۶
	1Vc	۹	۱۱/۰۱	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	۸/۹۷	۱۳/۰۶
	1.5Vc	۹	۵/۵۹	۰/۷۹۶	<۰/۰۰۱	۳/۵۴	۷/۶۴

در عملکرد جمع آوری ذرات است (جدول ۳). مقدار P_value نشان دهنده معنی داری نتایج است ($P_value < 0.001$). با استفاده از پس آزمون توکی برای شناسایی دقیق تر اینکه کدام سطوح ولتاژ مصرفی با یکدیگر تفاوت دارند استفاده شد. نتایج آن مطابق جدول ۷ می باشد.

بررسی فاکتور کیفیت دو دستگاه تصفیه

فاکتور کیفیت براساس رابطه ۳ محاسبه شد. برای

ذرات؛ ولتاژ مصرفی در ۴ سطح مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار V_c معرف ولتاژ آستانه تخلیه کرونا می باشد که به صورت تجربی در این آزمایش برابر ۱۸۰۰ ولت به دست آمد. بنابراین مقدار سطوح آن به ترتیب برابر ۹۰۰، ۱۸۰۰، ۲۷۰۰ و ۳۶۰۰ ولت مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۷). با افزایش ولتاژ، میانگین راندمان جمع آوری ذرات به طور کلی افزایش می یابد. علاوه بر آن با افزایش ولتاژ انحراف معیار کاهش می یابد که کاهش آن نشان دهنده افزایش یکنواختی و ثبات

قرار دادن توان مصرفی در رابطه ۴ مقدار انرژی مصرفی در هواگذر بهینه محاسبه شد. نتایج حاصل از آن مطابق جدول ۸ می باشد

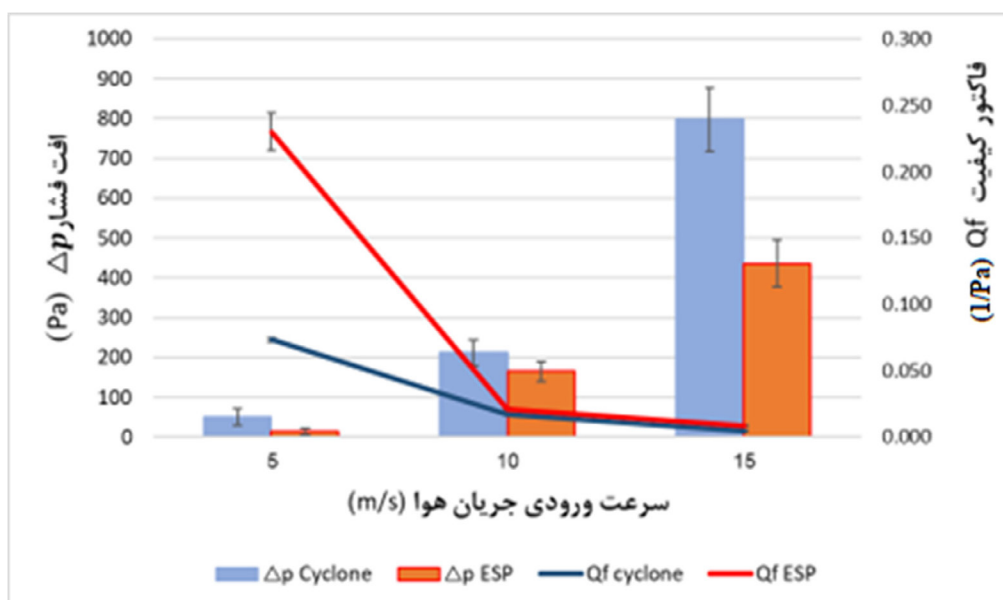
بحث

این مطالعه با هدف بررسی راندمان جمع آوری ذرات روی اکسید به تفکیک قطر ۵/۰-۱۰ میکرومتر در شرایط مختلف آزمایشگاهی در دو دستگاه تصفیه سیکلون و ESP انجام شد. علاوه بر آن میزان مصرف انرژی در ESP کوآکسیال DBD نیز اندازه گیری شد. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر می باشد:

محاسبه آن ابتدا مقدار افت فشار دستگاه در قبل و بعد از دستگاه تصفیه توسط مانومتر اندازه گیری شد و مقدار تفاوت آن از رابطه ۲ به دست آمد. نتایج حاصل از افت فشار و فاکتور کیفیت دو دستگاه مطابق شکل ۸ می باشد

بررسی انرژی مصرفی در ESP با مکانیسم کوآکسیال DBD

انرژی مصرفی براساس رابطه ۴ محاسبه شد. برای محاسبه آن ابتدا مقدار شدت جریان با استفاده از مولتی متر در ۴ سطح ولتاژ طرح آزمایش قرائت شد. سپس توان مصرفی با ضرب ولتاژ در شدت جریان محاسبه و با



شکل ۸: فاکتور کیفیت در دستگاه تصفیه سیکلون و ESP با مکانیسم کوآکسیال DBD

جدول ۸: میزان مصرف انرژی در ESP کوآکسیال DBD

ولتاژ مصرفی (V)	شدت جریان (A)	توان مصرفی (W)	انرژی مصرفی (J/L)
۹۰۰	۰/۰۰۷	۶/۳	۰/۶۴
۱۸۰۰	۰/۰۱۲	۲۱/۶	۲/۱۹
۲۷۰۰	۰/۰۲	۵۴	۵/۴۹
۳۶۰۰	۰/۰۳۳	۱۱۸/۸	۱۲/۰۹

تأثیر دما جریان هوای ورودی بر راندمان دو دستگاه تصفیه

در سیکلون و ESP براساس نتایج منتج شده از شکل ۴ مشاهده شد دمای جریان هوای کم تر (یعنی ۲۰ درجه سانتی‌گراد) در طرح آزمایش این مطالعه، دارای راندمان جمع آوری بیشتری می‌باشد. مطالعه تجربی W. Li و همکاران نشان داد که در دماهای بالا، راندمان جداسازی ذرات و افت فشار سیکلون به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کارایی سیکلون در جداسازی ذرات با افزایش دما، کاهش می‌یابد (۲۰). در مطالعه دیگر توسط A.Jafarnezhad و همکاران نتایج نشان داد که افزایش دما از ۶۰۰ کلوین به ۹۰۰ کلوین در نرخ جریان ورودی ثابت، منجر به کاهش قابل‌توجهی در راندمان جمع آوری ذرات به میزان ۸/۶۲ درصد شد (۲۱). در ESP این نتایج با نتایج مطالعه X.Xu و همکاران هم راستا بود. در این مطالعه با افزایش دما از ۳۰۰ درجه کلوین به ۵۰۰ کلوین راندمان جمع آوری کاهش یافت. این کاهش به میزان ۱۲ الی ۲۸ درصد محاسبه شد (۲۲). در مطالعه دیگر از همین محقق نشان داده شد افزایش دما از ۳۰۰ کلوین به ۹۰۰ کلوین علاوه بر کاهش راندمان جمع آوری، ولتاژ مصرفی را نیز از ۲۲ کیلوولت به ۸ کیلوولت کاهش داد که علت آن افزایش چگالی بار سطحی در ولتاژ اعمالی، با افزایش دما است (۲۳).

نتایج ذکر شده که بیان‌کننده ارتباط بین دما جریان هوا با راندمان جمع آوری ذرات می‌باشد هم‌راستا نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر است که نشان داد با افزایش دما راندمان جمع آوری کاهش می‌یابد. دانسیته گاز یک عامل مهم در کارایی جمع آوری سیکلون می‌باشد. تغییرات دما می‌تواند دانسیته گاز را تغییر دهد و منجر به تغییر در راندمان جمع آوری شود (۲۴). علت آن می‌تواند این باشد که ذرات به‌طور موثر توسط نیروهای گریز از مرکز سیکلون جذب نشوند و بر اثر کاهش دانسیته به سمت بالا و خروجی سیکلون حرکت نمایند. علاوه بر آن معمولاً افزایش دما می‌تواند بر ویسکوزیته جریان

گاز ورودی تأثیر بگذارد. دمای گاز بالاتر معمولاً منجر به ویسکوزیته کمتر می‌شود که می‌تواند دینامیک جریان را در رسوب دهنده سیکلون تغییر دهد. این تغییر می‌تواند منجر به جداسازی کمتر ذرات موثر شود (۲۱).

در ESP نیز افزایش دما منجر به کاهش دانسیته گاز تحت فشار اتمسفر و افزایش فاصله بین مولکول‌ها شده که به نوبه خود باعث ایجاد مسیر شتاب برای الکترون‌ها در میدان الکتریکی می‌شود. این الکترون‌های پرانرژی منجر به یک ناحیه یونیزاسیون بزرگ شده و یون‌های اضافی تولید می‌کنند که باعث افزایش جریان در همان ولتاژ اعمالی می‌شود. الکترون‌های پرانرژی منجر به ایجاد جرقه در هنگام تخلیه کرونا می‌شوند (۲۳).

تأثیر غلظت ذرات ورودی بر راندمان دو دستگاه تصفیه

در سیکلون مشاهده شد که با افزایش سائز ذرات بالای PM2.5 و افزایش غلظت ذرات ورودی راندمان جمع‌آوری در سیکلون افزایش می‌یابد (شکل ۵). این یافته در مطالعه قربانی و همکاران مشاهده شد که بین غلظت ورودی ذرات و راندمان جمع آوری سیکلون ارتباط معنادار می‌باشد ($P_value < 0.05$). این نتیجه می‌تواند مربوط به برخورد ذرات بیشتر به دیواره های سیکلون و احتمالاً برخورد ذرات با هم در داخل سیکلون باشد (۲۵). در مطالعه AC.Hoffmann و همکاران نیز نشان داده شد که با افزایش غلظت گرد و غبار در جریان هوا، راندمان جمع آوری ذرات به‌طور کلی افزایش و افت فشار کاهش می‌یافت (۲۶). بهبود عملکرد جمع آوری ذرات با افزایش غلظت ذرات ورودی و سرعت ورودی افزایش پیدا می‌کرد (۲۷).

در ESP نیز در سطح غلظت 0.5TLV نسبت به دو سطح دیگر دارای راندمان بیشتری می‌باشد. در مطالعه انجام شده توسط L.Chen و همکاران، راندمان جمع آوری ذرات در غلظت ذرات ورودی بین ۹۰۰ تا ۲۱۵۰۰ عدد در هر سانتیمترمکعب در شرایط یکسان رطوبت و ولتاژ مصرفی نشان داد که راندمان جمع آوری ذرات تحت تأثیر تغییر غلظت ذرات ورودی قرار نگرفت

(۲۸). این در حالی است که در مطالعه A.Estarque نشان داده شد که افزایش غلظت ذرات ورودی منجر به کاهش با شیب ملایم در راندمان جمع آوری ذرات در کلیه سایزهای مورد آزمایش شد (۲۹). در مطالعه حاضر نیز کاهش راندمان جمع آوری با افزایش غلظت ذرات در سایز ذرات بین ۶ تا ۱۰ میکرومتر مشاهده شده است که انحراف معیار در این سایز ذرات به طور میانگین حدود ۲ درصد کمتر از سایر قطر ذرات گزارش شده است (جدول ۳). در مطالعه X.Xu و همکاران نشان داده شد که در دمای جریان هوای ۳۰۰ کلوین و غلظت بالای ذرات بالا 390 mg/m^3 ، راندمان جمع آوری ذرات کمی بیشتر از غلظت ذرات پایین مشاهده شد. در سایر دماها، راندمان جمع آوری ذرات به میزان نزدیک بهم باقی ماند (۲۳). با توجه به اینکه در مطالعات مختلف تاثیر غلظت ذرات بر روی راندمان جمع آوری ذرات متفاوت است این رفتار می تواند ناشی از تغییرات در برهم کنش بین ذره ای و وقوع تجمع^۱ یا کلوخه شدن^۲ ذرات در غلظت های بالا باشد؛ پدیده ای که نخستین واکنش بین ذره ای در آئروسول ها محسوب می شود. هنگامی که ذرات آئروسول به دلیل حرکت نسبی خود با یکدیگر برخورد می کنند، ممکن است به هم بچسبند و ذرات درشت تری به نام آگلومرا^۳ تشکیل دهند. چسبندگی جنبشی^۴ زمانی به وجود می آید که حرکت نسبی ذره نتیجه یک نیروی خارجی مانند نیروی گریز از مرکز در سیکلون و یا نیروی الکتریکی در ESP باشد (۳۰).

تاثیر سرعت جریان هوا ورودی بر راندمان دو دستگاه تصفیه

در سیکلون نشان داده شد راندمان جمع آوری در سرعت های بالاتر (۱۵ متر بر ثانیه) بیشتر از سرعت های کم تر می باشد (شکل ۶). در مطالعه M.Ijaz و همکاران نشان داده شد که راندمان جمع آوری با افزایش سایز

ذرات و همچنین سرعت هوای ورودی افزایش می یابد. این مطالعه نشان داد که با افزایش سرعت تا ۲۰ درصد، راندمان جمع آوری ۷ درصد و با افزایش ۵۰ درصد سرعت، راندمان جمع آوری به میزان ۱۲ درصد افزایش یافت (۳۱). علاوه بر آن، سرعت ذرات در داخل سیکلون تحت تاثیر نیروهای متعدد، از جمله نیروهای گریز از مرکز و گرانشی است، که حرکت شتابدار ذرات تحت تاثیر آن قرار میگیرد (۳۲). در مطالعه M.Morin و همکاران، مطالعه در دو سرعت ورودی مجزای ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام شد. یافته ها نشان داد که سرعت های ورودی بالاتر می تواند کارایی جداسازی سیکلون را افزایش دهد، اما ممکن است منجر به افزایش افت فشار و چالش های عملیاتی بالقوه شود. این یافته نشان می دهد که بهینه سازی سرعت ورودی برای دستیابی به بهترین عملکرد در جداکننده های سیکلون بسیار مهم است (۳۳).

در ESP نشان داده شد با کاهش سرعت از ۱۵ به ۵ متر بر ثانیه به طور میانگین راندمان ۱۲/۵۷ درصد و از سرعت ۱۰ به ۵ متر بر ثانیه به طور میانگین ۵/۷۴ درصد راندمان افزایش می یابد (جدول ۳ و شکل ۶). سرعت ورودی به طور قابل توجهی بر راندمان ESP در جمع آوری ذرات تاثیر می گذارد. نتایج برخی از مطالعات نشان داده است که سرعت های ورودی کمتر و یکنواخت تر، راندمان جمع آوری را در ESP افزایش می دهد که منجر به بهبود عملکرد جمع آوری گرد و غبار می شود (۳۴، ۳۵). سرعت یکنواخت، تلاطم موجود در مسیر ذرات را به حداقل می رساند و امکان جذب ذرات بر روی صفحات افزایش می یابد. علاوه بر آن، برای داشتن راندمان جمع آوری ذرات بالا، باید سرعت ورودی در محدوده بهینه باقی بماند. سرعت های بالاتر می تواند منجر به افزایش آشفستگی جریان هوا شود و احتمال رسیدن ذرات به صفحات جمع آوری را کاهش دهد (۳۵، ۳۶). بنابراین، بهینه سازی سرعت ورودی برای به حداکثر رساندن راندمان ESP ضروری است. مطالعه های انجام شده توسط L.Chen و همکاران نشان داده اند که افزایش سرعت جریان هوا، تقریباً در کلیه قطر ذرات آلاینده، باعث کاهش راندمان

1. Agglomeration
2. Coagulation
3. Agglomerates
4. Kinematic coagulation

جمع آوری می‌شود (۲۸، ۳۷، ۳۸). از سوی دیگر نتایج نشان داد با دو برابر کردن سرعت هوا، زمان ماند در مراحل یونیزاسیون و جمع‌آوری و غلظت یون به طور همزمان در ناحیه باردارسازی ذرات به نصف کاهش یافت. این سه پارامتر به طور قابل توجهی بر راندمان حذف ذرات تأثیر گذاشت (۲۸).

تأثیر ولتاژ مصرفی بر راندمان رسوب دهنده الکترواستاتیک

نتایج نشان داد با افزایش ولتاژ مصرفی راندمان جمع آوری در کلیه قطر ذرات افزایش یافته است علاوه بر آن نتایج نشان داد با افزایش ولتاژ مصرفی از 0.5Vc، 1Vc، 1.5Vc به ولتاژ 2Vc؛ میانگین راندمان جمع آوری به ترتیب به مقدار ۱۸/۳۶، ۱۳/۰۶ و ۷/۶۴ درصد در کلیه قطر ذرات افزایش یافته است (شکل ۷). در مطالعه L.Chen و همکاران بر روی تخلیه کرونا منفی در بازه ۱/۷ تا ۶ کیلوولت و قطر ذرات ۰/۰۱ تا ۱۰ میکرومتر انجام شد که نتایج نشان داد با اعمال ولتاژ مصرفی بین دو الکترو، تقریباً در کلیه قطر ذرات، راندمان جمع آوری افزایش یافت. ولتاژ اعمال شده بالاتر منجر به غلظت یون منفی و بار ذرات بالاتر می‌شود و در نتیجه راندمان جمع آوری بالاتری به دست می‌آید (۲۸). در مطالعه M.Pirhadi و همکاران در بررسی تأثیر ولتاژ اعمالی بر راندمان جمع‌آوری ESP، نتایج نشان داد راندمان جمع‌آوری ESP در محدوده‌های اندازه مختلف با افزایش ولتاژ اعمالی، روند افزایشی داشته است. محقق علت آن را میدان الکتریکی قوی‌تر در ولتاژهای بالا ذکر نمود که منجر به شارژ بالاتر ذرات شد (۲، ۳۰).

بررسی فاکتور کیفیت دو دستگاه تصفیه

افت فشار سیکلون و ESP در شرایط یکسان با افزایش سرعت، افزایش یافت. براساس مقادیر اندازه گیری شده مطالعه نشان داد که افت فشار محاسبه شده در سیکلون به مراتب بیشتر از ESP بوده و فاکتور کیفیت در بهترین حالت برابر ۰/۰۷۳ بر پاسکال و در ESP در شرایط ای که بیشترین راندمان جمع‌آوری را دارد برابر ۰/۲۳ بر پاسکال

است که حدود ۳ برابر سیکلون می‌باشد. در مطالعه F.Fassani و همکاران مقایسه بین نتایج افت فشار با فرمول های تحلیلی لپل در سیکلون (۳۹) نشان داد که افزایش افت فشار با مربع سرعت ورودی، افزایش پیدا می‌کرد. در این حال برای سرعت های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه به ترتیب حدوداً ۹۰، ۲۱۵ و ۶۰۰ پاسکال محاسبه گردید که با افزایش سرعت، افت فشار به صورت نمایی افزایش یافت (۴۰).

نتایج مطالعه T.Dziudak که بر روی فاکتور کیفیت بین سیکلون با ورودی مماسی^۱ و ورودی محوری^۲ انجام شده بود نشان داد فاکتور کیفیت برای سیکلون با ورودی مماسی چندین برابر بیشتر از سیکلون با جریان ورودی محوری است. در این مطالعه برای سیکلون با ورودی مماسی راندمان جمع آوری نزدیک به ۹۵ درصد و با افت فشار ۵۰۰ الی ۳۰۰۰ پاسکال و برای ورودی محوری راندمان جمع آوری کمتر از ۹۰ درصد با افت فشار ۱۰۰ الی ۴۵۰ پاسکال مشاهده شد. فاکتور کیفیت در حالت اول بین ۰/۰۰۱ الی ۰/۰۰۶ بر پاسکال و در حالت دوم ۰/۰۰۵۱ الی ۰/۰۲۳ بر پاسکال به دست آمد که نشان دهنده ۳/۸ برابر کارایی بهتر سیکلون با ورودی محوری نسبت به ورودی مماسی است (۷).

افت فشار در سیستم‌های تصفیه به دلیل مقاومت در برابر جریان هوا رخ می‌دهد. در سیکلون‌ها، این افت فشار به علت انحراف شدید جریان هوا و نیروی گریز از مرکز لازم برای جداسازی ذرات اتفاق می‌افتد. با افزایش سرعت ورودی، افت فشار به شکل نمایی افزایش می‌یابد زیرا نیروی اصطکاک و مقاومت هوا با مجذور سرعت رابطه دارد (۴۱). بر اساس معادله برنولی و روابط دینامیک سیالات، در جریان‌های با سرعت بالا، تلاطم و اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد که این امر به نوبه خود باعث افت فشار بیشتری می‌شود (۴۲). در مقابل، در ESPها، نیازی به انحراف شدید جریان هوا نیست و ذرات معلق توسط نیروی الکتریکی به سمت صفحات جمع‌آوری کننده جذب

1. Tangential inlet reverse flow cyclone
2. Axial inlet reverse flow cyclone

می‌شوند، در نتیجه افت فشار کمتری ایجاد می‌شود (۴۳). فاکتور کیفیت یکی از معیار ارزیابی کارایی سیستم تصفیه با توجه به میزان جداسازی ذرات و افت فشار است. در سیکلون‌ها، افزایش سرعت باعث بهبود راندمان جمع‌آوری می‌شود اما افت فشار به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و این امر باعث کاهش فاکتور کیفیت می‌شود (۴۴). در ESPها، فاکتور کیفیت بالاتر به دلیل راندمان جداسازی بالا و افت فشار ناچیز است. بر اساس نتایج گزارش‌شده توسط C.Bacher و همکاران؛ عملکرد مطلوب این سامانه‌ها عمدتاً به بهره‌گیری از مکانیزم بارداری سازی یونی و مهاجرت الکترواستاتیکی ذرات وابسته است، به‌گونه‌ای که راندمان جداسازی بیشتر تابع انرژی ویژه مصرفی بوده و وابستگی به فرایندهای مکانیکی و افت فشار آیرودینامیکی در آن‌ها بسیار محدود است. این ویژگی امکان دستیابی به جداسازی با راندمان بالا را همراه با مصرف انرژی نسبتاً پایین فراهم می‌سازد، که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر هم‌راستا می‌باشد (۴۵).

بررسی انرژی مصرفی در ESP با مکانیسم کواکسیال DBD

نتایج نشان داد با افزایش ولتاژ مصرفی در ESP با مکانیسم کواکسیال DBD، شدت جریان عبوری افزایش می‌یابد (جدول ۸). با افزایش شدت جریان و ولتاژ مصرفی، میزان انرژی مصرفی در ESP با مکانیسم کواکسیال DBD نیز افزایش یافته است. با این حال، مقایسه با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای مبتنی بر تخلیه دی‌الکتریک می‌تواند به بهبود هم‌زمان راندمان جمع‌آوری و مصرف انرژی منجر شود (۴۶). در این راستا در مطالعه N.Zouzou گزارش شده است که نوع تخلیه ایجادشده در سامانه‌های DBD نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد آن‌ها دارد؛ به‌گونه‌ای که ایجاد تخلیه‌های رشته‌ای^۱ که توسط عایق دویل ایجاد میشود نسبت به تخلیه‌های پخشی^۲ که با عایق تک لایه ایجاد میشود، به

1. Filamentary discharge
2. Diffuse discharge

دلیل تولید نواحی میکروپلاسمای متمرکز با چگالی بالاتر، گونه‌های فعال و میدان الکتریکی موضعی قوی‌تر، موجب افزایش احتمال باردهی و به‌دام‌اندازی ذرات زیرمیکرونی می‌شود. این ویژگی سبب می‌گردد فرآیند جمع‌آوری ذرات با بازده بالاتر و در عین حال با انرژی ویژه کمتری انجام گیرد (۴۷). یافته‌های پژوهش حاضر نیز این رفتار را تأیید می‌کند، به‌طوری‌که در هواگذرهای ۷۵ تا ۲۲۵ لیتر بر دقیقه، راندمان نزدیک به ۷۰ درصد با انرژی مصرفی ۰/۶۴ تا ۱۲/۰۹ ژول بر لیتر به دست آمده است. از سوی دیگر انرژی مصرفی با کاهش هواگذر جریان ورودی افزایش یافت. در حالی که این افزایش بر راندمان جمع‌آوری ذرات تأثیر منفی نداشت و راندمان نیز با افزایش آن افزایش پیدا نمود. بالاترین راندمان جمع‌آوری ذرات در کمترین هواگذر جریان هوا (سرعت پایین ۵ متر بر ثانیه) و انرژی مصرفی به دست آمد که می‌تواند ناشی از تقویت تخلیه‌های موضعی و افزایش زمان ماند ذرات در میدان الکتریکی مؤثر باشد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد سیکلون و رسوب‌دهنده الکترواستاتیک مبتنی بر مکانیسم تخلیه دی‌الکتریک کواکسیال با تمرکز بر بهبود بهره‌وری انرژی همراه با حفظ راندمان بالای جداسازی ذرات بود. نتایج نشان داد که به‌کارگیری ساختار کواکسیال DBD در ESP توانست بدون ایجاد افت معنادار در راندمان جمع‌آوری ذرات در بازه ۰/۵ تا ۱۰ میکرومتر، مصرف انرژی سیستم را نسبت به ساختارهای متداول کاهش دهد؛ بنابراین هدف اصلی پژوهش مبنی بر دستیابی هم‌زمان به راندمان مطلوب و کاهش انرژی مصرفی محقق گردید.

مقایسه دو سیستم تحت شرایط عملیاتی یکسان نشان داد که اگرچه سیکلون در سرعت‌های بالاتر جریان و غلظت‌های بیشتر ذرات عملکرد بهتری از نظر افزایش راندمان نشان می‌دهد، این بهبود همواره با افزایش قابل توجه افت فشار همراه است که منجر به کاهش فاکتور

عددی کوپل شده دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و میدان الکتریکی برای شبیه سازی هم زمان جریان، باردار سازی و مهاجرت ذرات، می تواند درک عمیق تری از سازوکارهای حاکم بر عملکرد الکتروسیکلون فراهم سازد و ابزار قدرتمندی برای بهینه سازی پارامترهای طراحی در مقیاس صنعتی ارائه دهد. همچنین، بررسی نظام مند تأثیر پارامترهای عملیاتی کلیدی از جمله هواگذر جریان، نوع و غلظت ذرات، رطوبت و فشار گاز در شرایط پایلوت و صنعتی، می تواند به تعیین محدوده های عملکرد بهینه و افزایش قابلیت تعمیم نتایج به کاربردهای واقعی منجر شود. تمرکز بر این دو محور، مسیر توسعه نسل های کارآمدتر و کم مصرف تر سامانه های جداسازی ذرات را هموار خواهد ساخت.

≡ تعارض در منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچگونه منافع مالی یا شخصی، به صورت مستقیم یا غیرمستقیم که بتواند به عنوان تضاد منافع در ارتباط با این پژوهش تلقی شود، ندارند.

≡ تشکر و قدردانی

این مقاله از برخی از نتایج منتج شده از طرح بررسی راندمان فناوری هیبریدی کوآکسیال سیم-صفحه در مینی الکتروسیکلون در دانشگاه علوم پزشکی ایران می باشد. لذا از حمایت های مالی و معنوی آن کمال تشکر را دارد.

≡ کد اخلاق

این مقاله حاصل طرح بررسی راندمان فناوری هیبریدی کوآکسیال سیم-صفحه در مینی الکتروسیکلون با کد اخلاق IR.IUMS.REC.1401.968 در دانشگاه علوم پزشکی ایران می باشد.

کیفیت می شود. در مقابل، ESP به دلیل مکانیسم جداسازی الکتریکی، افت فشار بسیار ناچیزی داشته و در مجموع فاکتور کیفیت آن حدود ۳/۱۵ برابر بیشتر از سیکلون محاسبه شد. این یافته بیانگر برتری عملکردی ESP در کاربردهایی است که بهره‌وری انرژی و کنترل افت فشار اهمیت بالایی دارند. از نقاط قوت این مطالعه می توان به طراحی دو سیستم با ابعاد هندسی یکسان به منظور انجام یک مقایسه فیزیکی منصفانه، بررسی هم زمان شاخص های راندمان، افت فشار، مصرف انرژی و فاکتور کیفیت، و ارزیابی عملکرد در طیف گسترده ای از شرایط عملیاتی اشاره کرد. همچنین استفاده از ساختار کوآکسیال DBD به عنوان راهکاری نوین برای کاهش مصرف انرژی، جنبه نوآورانه و کاربردی این پژوهش را تقویت می کند.

≡ محدودیت پژوهش

با وجود طراحی کنترل شده دو سامانه، این مطالعه با برخی محدودیت های تجربی همراه بود که می تواند بر تعمیم پذیری نتایج اثرگذار باشد. نخست، پایداری منبع تغذیه در ستاپ آزمایشگاهی به دلیل نوسانات برق شهری با چالش مواجه بود و نیازمند تنظیم و پایش مستمر بود. دوم، عدم دسترسی به تجهیزات پیشرفته اندازه گیری پارامترهای ولتاژ بالای پلاسما (از جمله سنجش مستقیم چگالی یون و شدت میدان الکترومغناطیسی) امکان تحلیل دقیق تر رفتار تخلیه را محدود ساخت. علاوه بر این، کنترل غلظت ذرات ورودی با استفاده از سامانه غلظت ساز محقق ساخته انجام شد که هرچند عملکرد پایدار و تکرارپذیر داشت، اما فاقد کالیبراسیون صنعتی استاندارد بود. در نهایت، دامنه تغییرات برخی متغیرهای مستقل به دلیل محدودیت تجهیزات اندازه گیری گاز و شرایط عملیاتی، در بازه مشخصی محدود شد.

≡ پیشنهادها مربوط به کاربرد یافته ها

با توجه به یافته های این مطالعه، توسعه مدل های

REFERENCES

1. Zhang L, Ou C, Magana-Arachchi D, Vithanage M, Vanka KS, Palanisami T, et al. Indoor Particulate Matter in Urban Households: Sources, Pathways, Characteristics, Health Effects, and Exposure Mitigation. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(21).
2. Pirhadi M, Mousavi A, Sioutas C. Evaluation of a high flow rate electrostatic precipitator (ESP) as a particulate matter (PM) collector for toxicity studies. *Sci. Total Environ*. 2020;739:140060.
3. KRACHAI CB, REMAOUN SM, MILOUA F. Performance Evaluation of the Wire to Multicylinders Electrostatic Precipitator with PVC Powder. *IJEEES*. 2022;5(3).
4. Wang H, Zhang Y, Wang J, Liu H. Cyclonic Separation Technology: Researches and Developments. *Chin. J. Chem. Eng*. 2012;20(2):212-9.
5. Fu PB, Wang F, Yang XJ, Ma L, Cui X, Wang HL. Inlet particle-sorting cyclone for the enhancement of PM2. 5 separation. *Environ. Sci. Technol*. 2017 Feb 7;51(3):1587-94.
6. Chen C-J, Wang LF. Cost-benefit analysis of electrocyclone and cyclone. *Resour Conserv*. 2001;31(4):285-92.
7. Dziubak T. Experimental research on separation efficiency of aerosol particles in vortex tube separators with electric field. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci*. 2020:503-16--16.
8. Erol HI, Turgut O, Unal R. Experimental and numerical study of Stairmand cyclone separators: a comparison of the results of small-scale and large-scale cyclones. *Heat Mass Transf*. 2019;55:2341-54.
9. Kılıç M, Mutlu M, Altun AF. Numerical simulation and analytical evaluation of the collection efficiency of the particles in a gas by the wire-plate electrostatic precipitators. *Appl Sci*. 2022;12(13):6401.
10. Taiwo MI, Namadi MA, Mokwa B. Design and analysis of cyclone dust separator. *Am J Eng Res*. 2016;5(4):130-4.
11. Richter MC, Mainza AN, Govender I, Mangadoddy N, Sivakumar R, Sreedhar GE, Van Heerden MR. Features of near gravitational material tracers in a dense medium cyclone from PEPT. *Powder Technol*. 2023 Feb 1;415:118095.
12. Wen TY, Su JL. Corona discharge characteristics of cylindrical electrodes in a two-stage electrostatic precipitator. *Heliyon*. 2020;6(2):e03334.
13. Król A, Pomastowski P, Rafińska K, Railean-Plugaru V, Buszewski B. Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antiseptic activity and toxicity mechanism. *Adv Colloid Interface Sci*. 2017;249:37-52.
14. <https://www.msds.com/>. [Internet].
15. Lim K, Lee K, Kuhlman M. An experimental study of the performance factors affecting particle collection efficiency of the electrocyclone. *J. Aerosol Sci*. 2001;35(6):969-77.
16. https://www.astm.org/d3685_d3685m-13r21.html. [Internet].
17. Boichot R, Charvet A, Goldin T, Bernis A. Treatment of submicron particles using an electrostatic agglomerator in DC-negative voltage: Re-entrainment experimental study and modeling. *J. Electrostat*. 2009;67(4):574-82.
18. Bond TC, Doherty SJ, Fahey DW, Forster PM, Bernsten T, DeAngelo BJ, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of geophysical research: Atmos. Res*. 2013;118(11):5380-552.
19. Leray A, Guy A, Makarov M, Lombaert K, Cormier JM, Khacef A. Plasma-Assisted Diesel Oxidation Catalyst on Bench Scale: Focus on Light-off Temperature and NOx Behavior. *J. Catal*. 2013;56(1):222-6.
20. Li W, Chen J. Experimental research on cyclone performance at high temperature. *Front. Mech. Eng*. 2007;2(3):310-7.
21. Jafarnejad A, Salarian H, Kheradmand S, Khaleghinia J. Performance improvement of a cyclone separator using different shapes of vortex finder under high-temperature operating condition. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng*. 2021;43(2):81.
22. Xu X, Zheng C, Yan P, Zhu W, Wang Y, Gao X, et al. Effect of electrode configuration on particle collection in a high-temperature electrostatic precipitator. *Sep. Purif. Technol*. 2016;166:157-63.
23. Xu X, Gao X, Yan P, Zhu W, Zheng C, Wang Y, et al. Particle migration and collection in a high temperature electrostatic precipitator. *Sep. Purif. Technol*. 2015;143:184-91.
24. Shi L, Bayless DJ, Kremer G, Stuart B. CFD simulation of the influence of temperature and pressure on the flow pattern in cyclones. *Ind. amp; Eng. Chem*. 2006;45(22):7667-72.
25. Bahrami A, Qorbani F, Mahjub H, Aliabadi M. Effects of velocity and particles load on efficiency of cyclone in the stone crushing units at Azendarian Area. *J Res Health*

- Sci. 2023;8(1):12-7.
26. Hoffmann AC, Arends H, Sie H. An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solids loading on cyclone performance. *Filtr.* 2001; 28(3): 188-93.
27. Ganegama Bogodage S, Leung AY. Improvements of the cyclone separator performance by down-comer tubes. *J. Hazard. Mater.* 2016;311:100-14.
28. Chen L, Gonze E, Ondarts M, Outin J, Gonthier Y. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments. *Sep. Purif. Technol.* 2020;247:116964.
29. De Oliveira AE, Guerra VG. Influence of particle concentration and residence time on the efficiency of nanoparticulate collection by electrostatic precipitation. *J. Electrostat.* 2018;96:1-9.
30. Hinds WC, Zhu Y. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*: Head Neck.; 2022.
31. Ijaz M, Farhan M, Farooq M, Moeenuddin G, Nawaz S, Soudagar MEM, et al. Numerical investigation of particles characteristics on cyclone performance for sustainable environment. *Part. Sci. Technol.* 2021;39(4):495-503.
32. Song C, Pei B, Jiang M, Wang B, Xu D, Chen Y. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators. *Powder Technol.* 2016;294:437-48.
33. Morin M, Raynal L, Karri SBR, Cocco R. Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations. *Powder Technol.* 2021;377:174-85.
34. Haque SME, Rasul MG, Khan MMK, Deev AV, Subaschandar N. Influence of the inlet velocity profiles on the prediction of velocity distribution inside an electrostatic precipitator. *Therm. Fluid Sci.* 2009;33(2):322-8.
35. Chou HI, Liao CJ, Lu JH, editors. *The Effect of Inlet Design on the Flow Uniformity Inside ESP*. GTSD; 2018;23-24 Nov. 2018.
36. Kılıç M, Mutlu M, Altun AF. Numerical Simulation and Analytical Evaluation of the Collection Efficiency of the Particles in a Gas by the Wire-Plate Electrostatic Precipitators. *Appl Sci.* 2022; 12(13).
37. Huang S-H, Chen C-C. Ultrafine Aerosol Penetration through Electrostatic Precipitators. *Environ. Sci. Technol.* 2002;36(21):4625-32.
38. Kim M, Lim G-T, Kim Y-J, Han B, Woo CG, Kim H-J. A novel electrostatic precipitator-type small air purifier with a carbon fiber ionizer and an activated carbon fiber filter. *J. Aerosol Sci.* 2018;117:63-73.
39. Chelmuş A, Constantin M, Băran N. An Explicit Semi-Empirical Model for Cyclone Separator Cut Size with Swirl and Turbulence Corrections. *ChemEngineering.* 2026 May 20;10(5):67.
40. Fassani FLs, Goldstein L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency. *Powder Technol.* 2000;107(1):60-5.
41. Chen J, Jiang ZA, Chen J. Effect of Inlet Air Volumetric Flow Rate on the Performance of a Two-Stage Cyclone Separator. *ACS Omega.* 2018;3(10):13219-26.
42. Cheremisinoff P. *Air pollution control and design for industry*: Routledge; 2018.
43. Lima FD, Medeiros GB, Chagas PA, Aguiar ML, Guerra VG. Aerosol nanoparticle control by electrostatic precipitation and filtration processes—A review. *Powders.* 2023 Apr 10;2(2):259-98.
44. Chen DR, Pui DY. *Aerosol Instrumentation*. *J. Aerosol Sci.* 2013;61-87.
45. Bacher C, Lebedynskyy V, Fischer S, Riebel U. Discharge electrode geometry and energy efficiency in a one-stage wire-tube electrostatic precipitator operating at high concentrations of submicron liquid aerosol. *Environ. Technol.* 2020;41(16):2096-108.
46. Zheng C, Zhao Z, Guo Y, Zhao H, Weng W, Zhu W, et al. A real-time optimization method for economic and effective operation of electrostatic precipitators. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2020;70(7):708-20.
47. Zouzou N. Dielectric barrier discharge type electrostatic precipitators - An overview. *Int. J. Plasma Environ. Sci.* 2025;112-1:9(2).