



بررسی تجربی تاثیر افزودن پره‌راهنما به گرداب‌یاب بر افت فشار و راندمان آیروسیکلون

عباسعلی فدوی^۱ و روح اله رفعی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

چکیده

از جداکننده‌های آیروسیکلون در صنعت برای جداسازی ذرات جامد از فاز گاز استفاده می‌شود. علت جدایش ذرات در جداکننده‌های سیکلون، جریان درهم چرخشی قوی و اینرسی ذرات است. پارامترهای مهم برای طراحی سیکلون، راندمان و افت فشار می‌باشند. از آنجا که هندسه سیکلون به شدت روی راندمان و افت فشار تاثیر می‌گذارد، در این پژوهش با تغییر در هندسه گرداب‌یاب سیکلون و ساخت مدل‌های جدید، راندمان و افت فشار به صورت تجربی برای سیکلون‌ها با گرداب‌یاب‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. سیکلون بر مبنای طرح معمول استیرمند با بازه زیاد طراحی و ساخته شده است. برای هدایت مناسب جریان به داخل سیکلون، پره‌هایی با زاویه ۱۰ و ۲۰ درجه نسبت به افق روی گرداب‌یاب سیکلون استیرمند قرار داده شد. افت فشار در سرعت‌های مختلف ورودی جریان و راندمان جداسازی ذرات بصورت آزمایشگاهی به دست آمد و برای حالت‌های مختلف مقایسه گردید. نتایج تجربی نشان می‌دهند که با نصب پره‌های راهنما با پره‌راهنمای ۲۰ درجه نسبت به افق روی گرداب‌یاب، افت فشار به طور متوسط در سرعت‌های ۱۰ الی ۲۰ متر بر ثانیه نسبت به سیکلون معمول ۵۸ درصد کاهش یافته است و راندمان در سرعت مطلوب ۱۵ متر بر ثانیه، ۲/۳ درصد افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: آیروسیکلون؛ پره‌راهنما؛ افت فشار؛ راندمان؛ روش آزمایشگاهی.

Experimental Study on the Pressure Drop and Efficiency of an Aero-Cyclone with Guide Vanes on the Vortex Finder

A. Fadavi¹, R. Rafee^{2*}

¹ M.Sc. Student, Facult. of Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

² Assoc. Prof., Facult. of Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

Abstract

Cyclone separators are used to separate the solid particles from the gas streams in industrial applications. A strong swirling turbulent flow inside the aero-cyclone causes the particle separation due to their inertia. Two important parameters for cyclone design are the pressure drop and separation efficiency. The cyclone geometry strongly affects the efficiency and pressure drop. Therefore, in this article, different new geometries for the vortex finder of the cyclone are considered and tested experimentally. The efficiency and pressure drop have been measured and compared for different fabricated vortex finders. A typical high-efficiency Stairmand cyclone was considered and the guide vanes with an angle of 10 and 20 degrees to the horizontal plane were added to the original vortex finder. Experimental results show that for the guide vanes with 20 degrees angle, and at the gas velocities between 10 and 20 m/s, And the efficiency at the optimum speed of 15 meters per second has increased by 2.3%.

Keywords: Aero Cyclone; Guide Vanes; Pressure Drop; Efficiency; Experimental Method.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائلی که بشر با آن روبروست، موضوع آلودگی هوا است. در برخی از کارخانه‌ها در قسمت‌هایی از فرآیند ساخت، غبار زیادی تولید می‌شود. پخش گرد و غبار باعث افزایش آلودگی هوا و سبب ایجاد فضای خطرناک برای پرسنل از لحاظ تنفسی می‌شود؛ همچنین وجود گرد و غبار باعث کاهش راندمان تجهیزات موجود در کارخانه‌ها می‌شود.

جداکننده‌های گردبادی^۱ که اغلب سیکلون نامیده می‌شوند، در واقع ابزاری برای تصفیه سیال هستند. در این جداکننده‌ها از نیروی گریز از مرکز و تا حدودی از نیروی جاذبه برای تصفیه کردن و جداسازی ذرات کوچک استفاده می‌شود. از جداکننده‌ها برای جداسازی دو فاز از یکدیگر استفاده می‌شود [۱].

علت استفاده وسیع از سیکلون، قابلیت کارکرد در دما و فشار بالا، ساختمان ساده، ساخت آسان، عملکرد مقرون به صرفه و عدم وجود قطعه متحرک است. البته راندمان جداسازی سیکلون برای ذرات با سایز کمتر از ۵ میکرومتر کم است [۲].

دو پارامتر مهم برای جداکننده‌ها افت فشار و راندمان جدایش است. در طراحی سیکلون، تمامی تلاش‌ها برای افزایش راندمان و کاهش افت فشار انجام می‌پذیرد. مهمترین و تأثیرگذارترین عامل بر راندمان و افت فشار، هندسه سیکلون است. سیکلون‌ها اگرچه شکل و هندسه ساده‌ای دارند، اما جریان داخلی آنها بسیار پیچیده است. طراحی سیکلون‌ها اغلب به صورت تجربی بوده و حل تحلیلی معادلات حاکم به علت متغیرهای مختلف همواره با مشکل همراه بوده است.

سیکلون برای اولین بار توسط فینچ [۳] در سال ۱۸۸۵ در آمریکا اختراع شد. فینچ نام اختراع خود را غبارروب^۲ نامید. اولین ایده جداسازی ذرات غبار موجود در جریان گاز به سال ۱۸۰۰ میلادی بر می‌گردد. ذرات غبار موجود در جریان گاز زمانی که جریان گاز بسیار آرام است، ته‌نشین می‌شود؛ اما ایده فینچ از طریق ته‌نشینی نبوده و وی با ایجاد

جریانی با سرعت زیاد محفظه استوانه‌ای شکل را پیشنهاد کرد. وی توانست با استفاده از نیروی گریز از مرکز و نیروی جاذبه ذرات غبار را از گاز جدا کند. بعد از آن پیشرفت در زمینه طراحی سیکلون به سرعت افزایش یافت. در سال ۱۹۰۰ میلادی سیکلون‌های مدرنی ساخته شد که بسیار شبیه سیکلون‌های امروزی بود. بهترین نوع سیکلون توسط مورس در سال ۱۹۰۵ ساخته شد. وی در مورد دستگاه خود چنین نوشت: دستگاه من می‌تواند ذرات غبار را از هوا به وسیله مومنتوم جریان جداسازی کند و از لحاظ ساختاری بسیار ساده است [۴].

برناردو و همکارانش [۵]، به بررسی سیکلون گاز-جامد با زاویه‌های مختلف در ورودی پرداختند. در این پژوهش از مدل آشفتگی RSM استفاده شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که راندمان جداسازی برای زاویه ورودی ۴۵ درجه، به ۷۷/۲ درصد می‌رسد، در حالی که راندمان جداسازی برای ورودی معمولی با شرایط عملیاتی یکسان، ۵۴/۴ درصد است.

صفی‌خانی و همکاران [۶] به شبیه‌سازی عددی سیکلون‌هایی با بدنه مکعبی و بدنه دایره‌ای معمولی با قطر هیدرولیکی یکسانی پرداختند. در این پژوهش از مدل آشفتگی RSM استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که افت فشار در سیکلون‌هایی با بدنه مکعبی کمتر از افت فشار در سیکلون‌هایی با بدنه دایره‌ای است.

کیو و همکارانش [۷]، به بررسی عددی میدان جریان و راندمان جداسازی سیکلون واگرا پرداختند. در این پژوهش از مدل آشفتگی RSM استفاده شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت محوری و سرعت مماسی از بالا به پایین کاهش می‌یابد. تقریباً در این سیکلون واگرا ذرات با قطر بیشتر از ۵ میکرومتر جدا می‌شوند؛ همچنین این سیکلون توانایی زیادی در به دام انداختن ذرات با قطر کمتر از ۵ میکرومتر را دارند.

ژائو و همکارانش [۸]، به شبیه‌سازی رفتار جریان گاز و راندمان جداسازی در سیکلون با ورودی مماسی معمولی و ورودی دوتایی مارپیچی پرداختند. در این پژوهش از مدل آشفتگی RSM استفاده شده است. از روش لاگرانژی برای ردیابی ذرات و محاسبه راندمان جداسازی استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیکلون با ورودی دوتایی مارپیچ

^۱ Cyclone Separator

^۲ Dust Remover

عملکرد جداسازی جداکننده‌های سیکلون بهبود می‌یابد. آزمایش تجربی برای تایید برش گرداب‌یاب انجام شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که جداکننده با یک گرداب شکاف‌دار در ۲۲۵ می‌تواند ذرات بزرگتر از ۳/۵ میکرومتر را حذف کند. در حالی که جداکننده‌های عادی می‌تواند ذرات بزرگتر از ۸ میکرومتر را حذف کند. علاوه بر این بازده جداسازی جداکننده اصلی ۰/۷۳ است در حالی که راندمان جداسازی جداکننده بهبود یافته ۰/۷۶ است.

اسماعیلی و همکاران [۱۲]، با استفاده از سیکلون‌های مقیاس آزمایشگاهی (با قطر ۱۰ سانتی‌متر) و مقیاس نیمه صنعتی (با قطر ۴۵/۶ سانتی‌متر) آزمایش‌هایی به منظور بررسی تاثیر جریان برگشتی روی راندمان کلی جداسازی سیکلون‌ها انجام داده‌اند. با استفاده از این روش که در اینجا بنام سیکلون با جریان برگشتی نامیده شده است، قسمتی از جریان غبارآلود خروجی از سیکلون در محفظه‌ای که بنام محفظه جداسازی جریان برگشتی نامیده می‌شود، از جریان خروجی جدا شده و به داخل سیکلون برگشت داده می‌شود. بدین ترتیب قسمتی از ذرات ریز فرار کرده از سیکلون مجدداً از آن عبور داده می‌شوند. نتیجتاً راندمان دستگاه متناسب با درصد برگشتی بکار برده شده افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که راندمان کلی دستگاه متناسب با افزایش درصد جریان برگشتی بطور یکنواخت رو به ازدیاد دارد؛ بطوریکه، در نسبت‌های برگشتی بسیار زیاد نزدیک شدن به راندمان ۱۰۰٪ نیز امکان پذیر است. یکی از علل افزایش راندمان در اثر جریان برگشتی موضوع بهم چسبیدن ذرات ریز و تشکیل ذرات درشت‌تر تشخیص داده شده است. علاوه بر این نشان داده شده است که افزایش راندمان، در شرایطی که سرعت ورودی بداخل سیکلون از سرعت جست و خیز ذرات نیز تجاوز نماید، همچنان ادامه می‌یابد.

پرواز و همکاران [۱۳]، به بررسی اثرات کوچک کردن قطر خروجی آبروسیکلون بر عملکرد آن به روش عددی و با مدل آشفتگی تنش رینولدزی پرداخته‌اند. آنها از روش اویلری-لاگرانژی برای ردیابی ذرات استفاده کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که با کوچک شدن قطر خروجی افت فشار و سرعت مماسی افزایش می‌یابد و راندمان سیکلون افزایش می‌یابد.

سبب افزایش تقارن رفتار جریان گاز و در نتیجه سبب افزایش راندمان جداسازی می‌شود.

ژانگ و همکارانش [۹]، به مطالعه تجربی و عددی در مورد جداکننده سیکلون ورودی مماسی به همراه پره‌راهنمای ماریپیچی پرداختند که اغلب مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. مشخص شد که پره راهنمای ماریپیچی به میزان قابل توجهی در توزیع سرعت، شدت تلاطم، افت فشار و بازده جمع‌آوری در سیکلون تاثیر دارد. تجزیه و تحلیل میدان جریان در سیکلون‌ها نشان داد که میدان جریان با راهنمای ماریپیچ که تا حدودی به کار رفته شد، بهبود یافته‌است.

کاراگز [۱۰] به ارائه مشخصه‌های عملکردی جداکننده سیکلون جدید به صورت تجربی پرداخت. این سیکلون متفاوت از سیکلون مرسوم است. در این سیکلون به جای قسمت مخروطی از استوانه خارجی و محدودکننده گرداب استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برخی ذرات جامد هنگام پایین آمدن از سیکلون‌های مرسوم به جریان گاز خروجی کشیده شده و راندمان جدایش را کاهش می‌دهند. در حالی که در طرح آنها این اتفاق نمی‌افتد؛ همچنین در طرح آنها با افزایش طول سیکلون بدون ایجاد افت فشار بیشتر، زمان جدایش ذرات افزایش می‌یابد. راندمان جدایش سیکلون پیشنهاد شده از سیکلون مرسوم بیشتر است، اما افت فشار گاز در آن چندان متفاوت نیست.

لی ژیانگ و همکارانش [۱۱]، به مطالعه عددی و تجربی جداکننده‌های سیکلونی پرداختند که برشی مورب در گرداب‌یاب آنها انجام شده بود. چهار نوع جداکننده سیکلون با ساختارهای مختلف گرداب‌یاب مورد بررسی قرار گرفت. یکی از جداکننده‌ها برشی در گرداب‌یاب نداشت. در حالی که جداکننده‌های دیگر برشی در زوایای ۴۴ و ۱۳۵ و ۲۲۵ درجه نسبت به ورودی جداکننده‌ها داشتند. مدل انتقال تنش ناپایای تنش رینولدز RSM برای میدان جریان فاز گاز و مدل فاز گسسته DPM برای فاز ذرات انجام شد. میدان جریان نامتقارن در جداکننده با یک ورودی مماسی و توزیع سرعت محوری و سرعت مماسی و سرعت شعاعی در طول محیط دایره مورد بحث قرار گرفت. بازده ۴ مدل مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که راندمان جداسازی سیکلون نسبت به راندمان جداکننده‌های اصلی تا حد زیادی بهبود پیدا کرده است. هنگامی که موقعیت برش ۲۲۵ باشد،

$$\Delta p = \Delta H \left(\frac{1}{2} \rho_p v_i^2 \right) \quad (2)$$

ρ_p چگالی ذره، kg/m^3

v_i سرعت ورودی سیال، m/s

ΔH پارامتری به نام افت هد است و برای هر سیکلون به هندسه سیکلون بستگی دارد.

برای تخمین افت فشار دو سیکلون بازده بالا و نرخ عبوری بالا از معادله تجربی استیرمند استفاده می‌شود [۱۷].

$$\Delta p = \frac{\rho_f}{203} \left\{ u_1^2 \left[1 + 2\theta^2 \left(\frac{2r_t}{re} - 1 \right) \right] + 2u_2^2 \right\} \quad (3)$$

u_1 سرعت لوله‌ی ورودی، $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

u_2 سرعت لوله‌ی خروجی، $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

r_t شعاع دایره‌ای که خط مرکزی ورودی به آن مماس است، m

r_e شعاع لوله‌ی خروجی، m

با افزایش دبی و سرعت، راندمان سیکلون افزایش می‌یابد که پدیده طبیعی است؛ ولی با افزایش بیشتر سرعت و فراتر رفتن سرعت ورودی نسبت به سرعت جست و خیز ذرات، راندمان کاهش می‌یابد. در سیکلون معمول استیرمند ماکزیمم راندمان معمولاً در نسبت $\frac{v_i}{v_s} \approx 1/25$ اتفاق می‌افتد [۱۷].

$$v_s = 2.055 \omega \left\{ \frac{\left(\frac{W}{D} \right)^{0.4}}{\left(1 - \frac{W}{D} \right)^{0.333}} \right\} D^{0.067} v_i^{0.667} \quad (4)$$

$$\omega = \left[\frac{4g\mu(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f^2} \right]^{1/3} \quad (5)$$

W پهنای ورودی سیکلون، m

μ ویسکوزیته‌ی گاز، $\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$

D قطر بدنه‌ی سیکلون، m

ρ_f چگالی گاز، kg/m^3

طراحی یک سیکلون به وسیله گروه‌های بدون بعد انجام می‌شود. دو گروه بدون بعد اویلر و استوکس در طراحی سیکلون کاربردهای فراوانی دارد [۱۷].

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_p v_i^2} \quad (6)$$

$$St = \frac{d_p^2 \rho_p v_i}{18\mu D} \quad (7)$$

عدد اویلر نسبت تغییرات فشار بر فشار دینامیکی را نشان می‌دهد. عدد استوکس از تقسیم نیروی گریز از مرکز بر نیروی درگ که هر دو بر ذره‌ای با قطر مشخص عمل

در پژوهشی دیگر واحدی و همکاران [۱۴]، اثر استفاده از دو مخروط پیاپی را در ساختار سیکلون بر عملکرد آن بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که افزودن مخروط دوم به انتهای سیکلون سبب افزایش راندمان می‌شود، ولی افت فشار جریان گاز را هم بیشتر خواهد کرد.

در پژوهش ژو و همکارانش [۱۵]، سیکلون جدیدی را معرفی کردند که با نصب پره و بافل داخل گرداب‌یاب افت فشار و راندمان به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرده بود. مطالعه ایشان اهمیت اصلاح جریان و نقش موثر هندسه گرداب‌یاب را بر عملکرد سیکلون نشان می‌دهد.

کاهش مصرف برق در غبارگیرهای صنایع بسیار مهم است. از طرفی مطابق با قوانین افت فشار در سیکلون‌ها، با افزایش سرعت سیال در ورودی، میزان افت فشار و به دنبال آن میزان مصرف برق نیز افزایش می‌یابد؛ لذا افت فشار یک پارامتر مهم در سیکلون‌ها است. همان طور که گفته شد، تحقیقات زیادی درباره تغییر ابعاد سیکلون‌ها برای کاهش افت فشار و افزایش کارایی سیکلون‌ها انجام گرفته است؛ لذا هدف از ارائه این مقاله، ارائه هندسه جدیدی بر کاهش قابل ملاحظه افت فشار در سیکلون طراحی شده است.

در پژوهش حاضر با افزودن پره‌هایی با زاویه ۱۰ و ۲۰ درجه نسبت به افق، راندمان و افت فشار به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. روی دو مدل گرداب یاب، ۵ پره با فاصله‌های مساوی از هم در ورودی سیکلون قرار داده شد. افت فشار و راندمان در سرعت‌های ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه به دست آورده شده و با سیکلون معمول استیرمند بازده بالا مقایسه گردیده است.

۲- روابط فیزیکی

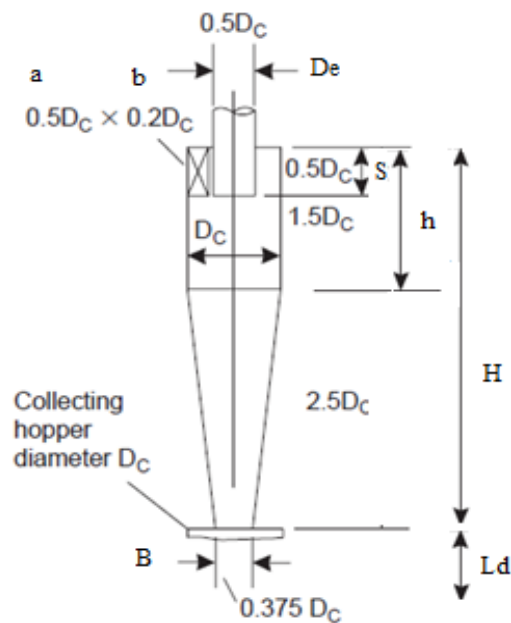
راندمان بر اساس توزیع جرمی می‌تواند تعریف شود. جهت محاسبه بازده کلی باید وزن ذرات جمع‌آوری شده از سیکلون نسبت به کل تعداد ذرات ورودی سنجیده شود [۱].

$$\eta = \frac{m_B}{m_{tot}} \quad (1)$$

m_{tot} وزن کل ذرات جامد وارد شده به دستگاه، kg

m_B وزن کل ذرات جمع‌آوری شده از دستگاه است، kg

هرچند نمی‌توان رابطه جامع و دقیقی برای افت فشار در داخل سیکلون ارائه داد، اما می‌توان رابطه کلی افت فشار را به صورت رابطه (۲) بیان کرد [۱۶].



شکل ۱- نسبت ابعادی سیکلون ساخته شده [۱۷]



شکل ۲- سیکلون طراحی شده

می‌کنند، به دست می‌آید. به عبارتی عدد استوکس برای ذره‌ای که به همراه گاز داخل محفظه‌ای حرکت می‌کند، از تقسیم نیروی که سبب تغییر جهت حرکت ذره می‌شود، نیروی درگی به دست می‌آید که در خلاف جهت حرکت ذره وارد می‌شود.

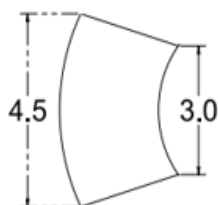
۳- شرح دستگاه

استیرمند دو طرح استاندارد برای طراحی سیکلون‌های گاز-جامد معرفی کرد: سیکلون با بازده جمع‌آوری بالا و سیکلون با دبی عبوری بالا. سیکلون‌های طراحی شده در این پژوهش شبیه به سیکلون با بازده جمع‌آوری بالا استیرمند است. در یکی از سیکلون‌ها در قسمت ورودی سیکلون پره‌هایی با زاویه ۱۰ و در سیکلون دیگر پره‌هایی با زاویه ۲۰ درجه نسبت به افق روی گرداب‌یاب سیکلون استیرمند قرار داده شد. نسبت ابعادی سیکلون‌های ساخته شده بر حسب قطر در شکل ۱ و ابعاد سیکلون ساخته شده در جدول ۱ نشان داده شده است. جنس سیکلون مورد استفاده در این پژوهش از آلومینیوم با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر است. در این سیکلون قسمت‌های مختلف با پیچ و مهره به هم متصل شده‌اند و درزهای ناشی از اتصال صفحه‌ها با بتونه آهنی پر شده است. سیکلون ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- ابعاد سیکلون مورد بررسی

ابعاد هندسی	مقدار (mm)
a	۲۰
b	۵۰
De	۵۰
h	۱۵۰
H	۴۰۰
Ld	۴۰
B	۳۷/۵
s	۵۰
D	۱۰۰

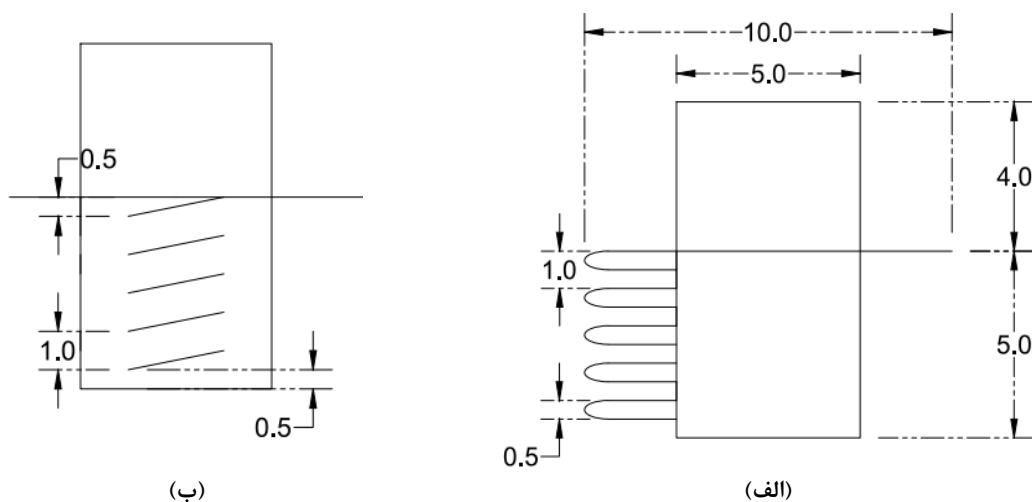
گرداب‌یاب نصب شده‌اند. شعاع درونی پره برابر با شعاع گرداب‌یاب و شعاع بیرونی پره معادل با شعاع بدنه استوانه‌ای سیکلون است. این مدل در شکل ۶ و ۷ و پره‌های به کار رفته در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- پره به کار رفته با زاویه ۱۰ درجه نسبت به افق ابعاد برحسب سانتیمتر

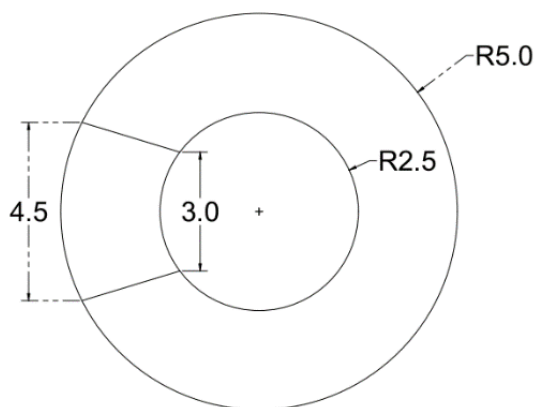
۳-۱- سیکلون با پره راهنمای ۱۰ درجه نسبت به افق در این مدل ۵ پره با زاویه ۱۰ درجه نسبت به افق در ورودی قرار داده شده‌اند. این پره‌ها روی گرداب‌یاب نصب شده‌اند و شعاع درونی پره برابر با شعاع گرداب‌یاب و شعاع بیرونی پره معادل با شعاع بدنه استوانه‌ای سیکلون است. تمامی ابعاد قسمت‌های دیگر مطابق جدول ۱ است. پره‌های به کار رفته در شکل ۳ و مدل ساخته شده در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۳-۲- سیکلون با پره راهنمای ۱۰ درجه نسبت به افق در این مدل همانند مدل سیکلون با پره‌راهنما ۱۰ درجه نسبت به افق، ۵ پره به صورت افقی ولی با زاویه ۲۰ درجه نسبت به افق در ورودی قرار داده شده‌اند. پره‌ها روی



(ب)

(الف)



(ج)

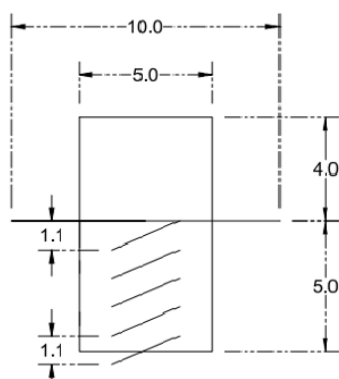
شکل ۴- نمایی از پره‌راهنما نصب شده روی گرداب‌یاب (ابعاد به سانتی‌متر): (الف) نما از روبرو، (ب) نمای جانبی و (ج) نما از پایین



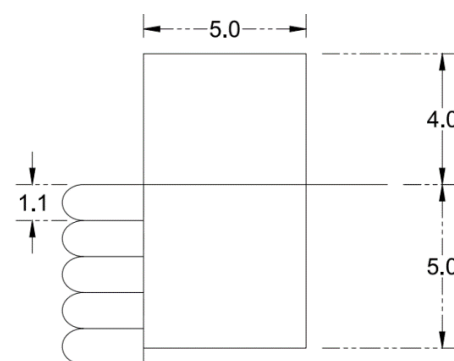
شکل ۷- مدل جدید ساخته شده با پره‌ها ۲۰ درجه نسبت به افق



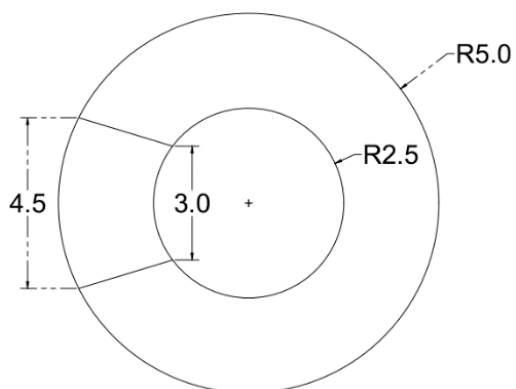
شکل ۵- مدل جدید ساخته شده با پره‌ها ۱۰ درجه نسبت به افق



(ب)

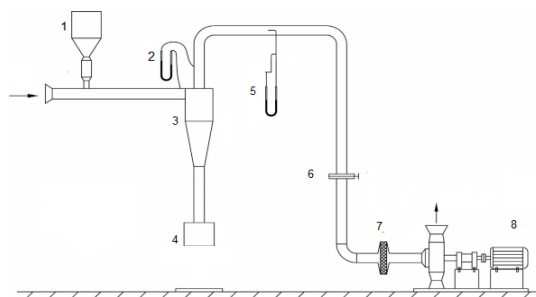


(الف)



(ج)

شکل ۶- مدل جدید با پره‌ها ۲۰ درجه نسبت به افق ابعاد به سانتی متر؛ الف) نما از روبرو، ب) نمای جانبی و ج) نما از پایین



(الف) شکل شماتیک دستگاه



(ب) عکس دستگاه ساخته شده

شکل ۸- شکل کلی سیستم تجربی (۱) مخزن تزریق ذره، (۲) مانومتر (۳) سیکلون (۴) مخزن جمع آوری ذرات (۵) لوله پیتوت (۶) شیر (۷) فیلتر (۸) موتور

قطعیته میانگین داده‌ها نزدیک به سه درصد و برای هر داده تکی بعدی ۷/۹ درصد محاسبه شده است. ژانگ و همکارانش [۹] پیشنهاد کرده‌اند که برای آنکه درصد خطا در هر آزمایش به زیر ۵ درصد برسد، هر کدام از آزمایش‌ها ۳ بار تکرار شود. براین اساس در این پژوهش آزمایش‌های راندمان سه بار تکرار گردیده است. به روش مشابه برای به دست آوردن عدم قطعیت دبی جرمی تزریق ذره عمل شد و میانگین داده‌ها ۲ گرم بر ثانیه و عدم قطعیت آن به مقدار ۴/۴ درصد به دست آمد.

ذرات با نرخ $2 \frac{gf}{s}$ توسط فن مکند به داخل سیکلون هدایت می‌شوند. دبی جریان هوا توسط شیر کنترل شده و توسط پیتوت تیوب اندازه‌گیری می‌شود. ذرات جدا شده توسط سیکلون داخل یک مخزن انباشته می‌شود که زیر سیکلون تعبیه شده است و تخلیه به صورت ناپیوسته صورت می‌پذیرد. این مخزن دارای شکل استوانه‌ای بوده و به وسیله یک صفحه به قسمت مخروطی سیکلون توسط پیچ و مهره وصل شده است که قابل بازکردن است. به این ترتیب می‌توان

۴- شرایط آزمایش

آزمایش‌ها در فشار اتمسفر و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. سرعت ورودی به داخل سیکلون جهت انجام تست افت فشار و راندمان از $10 \frac{m}{s}$ تا $20 \frac{m}{s}$ متغیر است. نمونه ذرات استفاده شده کربنات کلسیم با چگالی $2741 \frac{kg}{m^3}$ است. مشخصات دقیق هوا به صورت زیر است [۱۸].

$$p = 101325 \text{ (Pa)} = 1 \text{ atm}$$

$$T = 20^\circ C = 293 \text{ K}$$

$$R = 286.9 \frac{J}{kg \text{ K}}$$

$$p = \rho RT$$

$$\rho = \frac{101325}{293 \times 286.9} = 1.2053 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 1.511 \times 10^{-5} \text{ m}^2/s \quad (8)$$

با توجه به نزدیکی محل تست در کنار دریا و کنترل کردن رطوبت، فشار ۱ اتمسفر با توجه به دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده، از جداول ترمودینامیکی به دست آورده شد و چگالی مطابق رابطه گازهای کامل به دست آمد. لازم به ذکر است، چگالی به دست آمده از جداول ترمودینامیکی با توجه به داده‌های دما و فشار، مقداری برابر با چگالی به دست آمده از رابطه‌ی گاز کامل دارد.

۵- تجهیزات آزمایشگاهی

سیستم تجربی جهت بررسی راندمان و افت فشار شامل دستگاه‌هایی از قبیل: (۱) مخزن تزریق ذره (۲) مانومتر (۳) سیکلون (۴) مخزن گرد و غبار (۵) لوله پیتوت (۶) شیر (۷) فیلتر (۸) موتور است و در شکل ۸ نشان داده شده است. در ادامه به بررسی هریک از اجزا پرداخته می‌شود.

به منظور تزریق ذره در جریان قبل از سیکلون دستگاهی طراحی شده که بتواند با غلظت ثابت، ذرات را به سیستم تزریق کند. محاسبه عدم قطعیت داده‌های افت فشار بر اساس روش آماری ارائه شده توسط هولمن [۱۹] انجام می‌شود. مقدار میانگین داده‌ها با اطمینان ۹۵ درصد در بازه $\pm \frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$ قرار می‌گیرد (t ضریب توزیع دانشجویی، σ انحراف معیار و n تعداد داده‌هاست). بر این اساس، مقادیر مقدار عدم

$$\Delta p_{\text{غبار}} = \frac{\Delta p}{1 + 0.0086 (c_i^{0.5})} \quad (9)$$

اختلاف بین نتایج آزمایش‌ها و روابط موجود برای افت فشار در بدترین حالت، یعنی سرعت‌های پایین (۱۰ متر بر ثانیه)، ۴ درصد بود و با افزایش سرعت تا ۲۰ متر بر ثانیه اختلاف بین تجربی و تحلیلی به ۱ درصد رسید. دلیل آن هم این است که در سرعت‌های پایین مقدار ارتفاع آب در لوله پیتوت کم بوده و مقدار خطا نسبت به سرعت‌های بالا بیشتر است. افت فشارهای آزمایشی و به دست آمده از روابط در جدول ۲ نشان داده شده است.

افت فشار در این نوع سیکلون با پره راهنمایی که روی گرداب‌یاب نصب شده‌اند، در سرعت‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر بر ثانیه تست و اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که در این نوع از سیکلون با افزایش سرعت ورودی، افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

افت فشار سیکلون با پره‌راهنمای ۱۰ درجه نسبت به افق با سیکلون معمول مقایسه شده است و در شکل ۹ نشان داده شده است و می‌توان نتیجه گرفت، در سیکلون جدید در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به افت فشار در سرعت‌های دیگر دارای درصد اختلاف بیشتری با سیکلون معمول می‌باشد و افت فشار در این سرعت نسبت به سیکلون معمول ۳۲ درصد کمتر شده است. با توجه به رابطه بیان شده برای افت فشار، با افزایش سرعت، افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۲- مقایسه مقادیر افت فشار اندازه‌گیری شده و روابط موجود برای سیکلون استیرمند معمول

سرعت (m/s)	افت فشار روابط موجود (Pa)	افت فشار تجربی (کار حاضر) (Pa)
۱۰	۳۱۶/۹۸	۳۳۲/۵۴
۱۲	۴۹۸/۸	۵۱۳
۱۴	۶۸۲/۳۷	۶۶۴
۱۶	۸۹۱/۱۶	۸۶۹
۱۸	۱۱۱۵	۱۰۹۵
۲۰	۱۳۶۹/۳	۱۳۷۹

با جداکردن صفحه مخزن غبار جمع شده را تخلیه کرد. مخزن به گونه‌ای طراحی شده تا هوا از بیرون وارد سیکلون نشود. به منظور تعیین افت فشار سیکلون، مانومتر U شکل طراحی شده و در ورودی سیکلون و خروجی سیکلون نصب شده است. پیتوت تیوب طراحی شده برای جلوگیری از گرفتن سوراخ‌هایش بعد از سیکلون نصب شده است. نمونه ذرات در سیستم توسط الک با مش‌های ۶۰۰ و ۱۰۰۰ طبقه‌بندی شده‌اند و قطر متوسط ذرات ۱۵ μm است. در قسمت انتهایی سیکلون به منظور پیشگیری از آسیب دیدن موتور فیلتری تعبیه شده تا ذرات فرار کرده از سیکلون به موتور آسیب نرسانند. تمامی لوله‌های به کار رفته در آزمایش قطری معادل ۶ سانتی‌متر دارند.

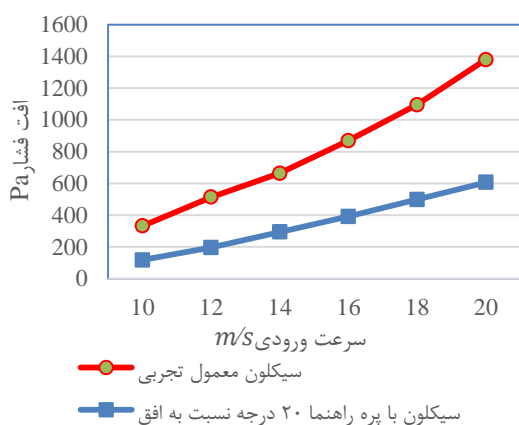
۶- نتایج

یک پیش‌بینی دقیق از افت فشار تا حد زیادی می‌تواند در هزینه‌های ساخت یک سیکلون تاثیرگذار باشد. از این رو این پارامتر از دیدگاه بازدهی و اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. و قسمت عمده افت فشار در بدنه سیکلون شامل افت فشار ناشی از تلفات انرژی و تنش و اسکوز جریان آشفته چرخشی است و قسمت کمتر آن شامل افت فشار در ورودی و خروجی و اصطکاک در دیواره است. به دست آوردن نسبت درستی متشکل از دبی و میزان افت فشار و همچنین ضریب افت فشار در هر کدام از این موارد می‌توان از نسبت‌های مناسبی برای طراحی سیکلون استفاده کرد. در این بخش ابتدا افت فشار در سیکلون معمول براساس رابطه‌های تجربی موجود به دست آورده شد و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه شد. سپس افت فشار تجربی در سیکلون‌های جدید به دست آورده شد و با سیکلون معمول مقایسه شده است.

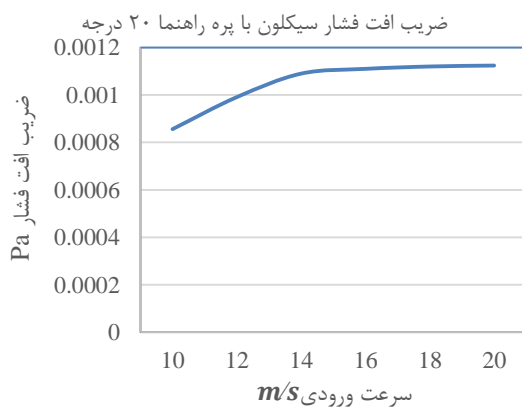
باید توجه نمود که روابط موجود افت فشار، مختص گازهای تمیز بوده و با افزایش غلظت غبار با افت فشار کمتری مواجه خواهیم بود. شواهد تجربی نشان می‌دهد که وجود غبار باعث کاهش یافتن سرعت مماسی می‌شود و سبب کاهش اکسپوننت گردبادی می‌شود [۲۰]. رابطه افت فشار به همراه غبار به صورت زیر است و طبق رابطه، افت فشار به همراه غبار میزان کمتری نسبت به افت فشار بدون غبار دارد [۱].

به دنبال آن افت فشار نیز افزایش پیدا می‌کند. افت فشار این نوع سیکلون با سیکلون معمول مقایسه شده است و در شکل ۱۱ نشان داده شده است و افت فشار بدون پره در شکل ۱۲ نشان داده شده است. می‌توان نتیجه گرفت، در سیکلون جدید در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به افت فشار در سرعت‌های دیگر دارای درصد اختلاف بیشتری است و افت فشار در این سرعت نسبت به سیکلون معمول ۶۴/۷٪ کمتر شده است.

با مقایسه این نوع سیکلون و سیکلون با پره راهنما ۱۰ درجه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه پره‌ها در ورودی افت فشار به صورت قابل توجهی کم می‌شود و منحنی افت فشار در این نوع سیکلون دارای شیب کمتری نسبت به سیکلون با پره راهنمای ۱۰ درجه است. در این



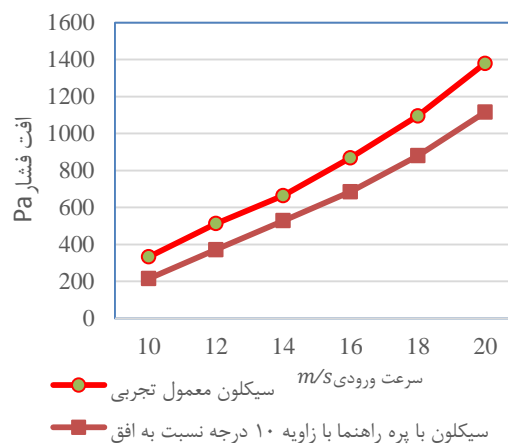
شکل ۱۱- مقایسه افت فشار در سیکلون با پره راهنمای ۲۰ درجه و سیکلون معمول



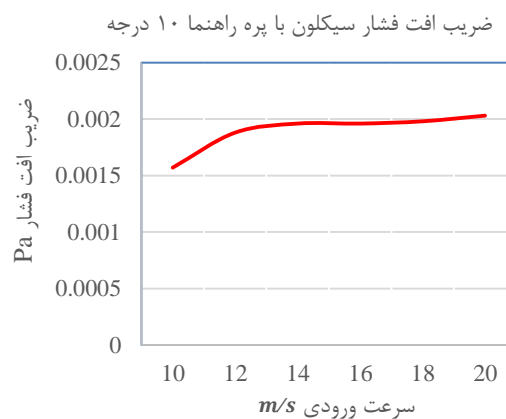
شکل ۱۲- عدد اویلر سیکلون با پره راهنما ۲۰ درجه

نمودار ضریب افت فشار بر حسب سرعت مماسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. منحنی ضریب افت فشار در این مدل از سیکلون از سرعت ۱۰ تا ۱۴ متر بر ثانیه دارای شیب بیشتری و از سرعت ۱۴ متر بر ثانیه تا ۲۰ متر بر ثانیه دارای شیب کمتری است. می‌توان نتیجه گرفت، وقتی سرعت ورودی از مقدار ۱۴ متر بر ثانیه تجاوز نماید، ضریب افت فشار دچار تغییر اندکی می‌شود.

افت فشار در سیکلون با پره راهنمایی که با زاویه ۲۰ درجه نسبت به افق روی گرداب‌یاب نصب شده‌اند، در سرعت‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر بر ثانیه تست و اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که در این نوع از سیکلون با افزایش سرعت ورودی سرعت مماسی افزایش پیدا می‌کند و



شکل ۹- مقایسه افت فشار در سیکلون با پره راهنمای ۱۰ درجه و سیکلون معمول



شکل ۱۰- عدد اویلر سیکلون با پره راهنما ۱۰ درجه

که در دبی‌های مختلف روی سیکلون در شرایط استاندارد انجام شد، ارتباط بین راندمان سیکلون نسبت به دبی مشخص گردید.

نتایج بازده به دست آمده محدود به ذرات با سایز متوسط ۱۵ میکرون است. تست‌های افت فشار بدون تزریق ذره انجام شد. باید توجه نمود، تئوری‌های افت فشار نیز مختص گازهای تمیز بوده و با افزایش غلظت غبار، افت فشار کمتر خواهد بود.

سیکلون‌های جدید و معمول در سرعت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. با افزایش سرعت در ورودی سیکلون، راندمان تا سرعت ۱۵ متر بر ثانیه افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزایش بیشتر سرعت و به دنبال آن دبی، راندمان کاهش پیدا می‌کند و دلیل آن هم این است که ذرات به هنگام برخورد به دیواره به علت سرعت زیاد (سرعت جست و خیز ذرات) به جای اینکه ته‌نشین شوند، دوباره به جریان داخل گاز بر می‌گردند. سرعت مطلوب برای سیکلون معمول، ۱۵ متر بر ثانیه یافت شد. البته نکته مهمی که به آن باید توجه داشت، این است که سرعت جست و خیز ذرات بین سرعت‌های ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد. ماکزیمم راندمان به دست‌آمده برای سیکلون معمولی نیز ۹۴/۶ درصد است.

در شکل ۱۳ راندمان سیکلون با پره‌راهنمای ۱۰ درجه نسبت به ورودی بر حسب سرعت ورودی نشان داده شده است. در این نوع سیکلون راندمان در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، نزدیک به یک درصد بهبود پیدا کرده است. سرعت جست و خیز ذرات بین سرعت‌های ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد و می‌توان نتیجه گرفت، در تمامی سرعت‌های تست شده راندمان بهبود یافته است.

سیکلون با پره‌راهنما با زاویه ۲۰ درجه نسبت به افق در سرعت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. با افزایش سرعت در ورودی سیکلون، راندمان افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزایش بیشتر سرعت و به دنبال آن دبی، راندمان کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۳ راندمان در سیکلون با پره‌راهنمای ۲۰ درجه در ورودی نسبت به سرعت ورودی را نشان می‌دهد. در این نوع سیکلون نسبت به سیکلون معمول در سرعت مطلوب ۱۵ متر بر ثانیه راندمان ۲/۳ درصد بهبود یافته است. منحنی بازده شیب کمتری را نسبت به منحنی

سیکلون فشارهای ناشی از تغییرات سرعت در منطقه هسته مرکزی نسبت به سیکلون با پره‌راهنما ۱۰ درجه کمتر بوده و فشار استاتیک مقدار بیشتر دارد و مقدار فشار در گرداب‌یاب بیشتر است. منحنی افت فشار این مدل سیکلون همانند سیکلون با پره‌راهنما ۱۰ درجه است.

پره‌راهنمای استفاده شده در سیکلون‌ها در واقع هدایت‌کننده جریان می‌باشند و تلفات انرژی دورانی را به شدت کاهش می‌دهند. همین امر سبب کاهش قابل توجه افت فشار می‌شود. از میان فاکتورهای ذکر شده تاثیرگذار روی افت فشار، تلفات انرژی دورانی بیشترین تاثیر را بر افت فشار سیکلون‌ها دارند و به کار بردن پره‌های تنظیم جریان سبب تقویت انرژی دورانی می‌شود. پره‌های تنظیم‌کننده جریان باعث می‌شود که حداکثر سرعت مماسی در خارج از هسته مرکزی (گردباد درونی) و نزدیک به دیواره اتفاق بیفتد و سرعت مماسی و محوری در هسته مرکزی کاهش یابد و افت فشار ناشی از تغییرات سرعت در این ناحیه کمتر شده و فشار استاتیک و فشار کل در منطقه هسته مرکزی افزایش می‌یابد. ژو و همکارانش [۱۵] نشان دادند که استفاده از پره‌های تنظیم جریان در طور محور سیکلون و داخل گرداب‌یاب، علاوه بر این که افت فشار را به خوبی بهبود می‌دهد، بر بازده جداسازی ذرات نیز تاثیرگذار است. حداکثر سرعت مماسی گاز در سیکلون در هسته‌ی مرکزی و در نزدیکی خروجی گاز اتفاق می‌افتد. سرعت مماسی و سرعت محوری در ناحیه هسته مرکزی بالا رنده کاهش می‌یابد. وجود این پره‌ها باعث افزایش فشار استاتیکی و فشار کلی در نزدیکی محور می‌شوند. چنین پره‌هایی قادر خواهند بود که افت فشار را به میزان قابل توجهی کاهش دهند.

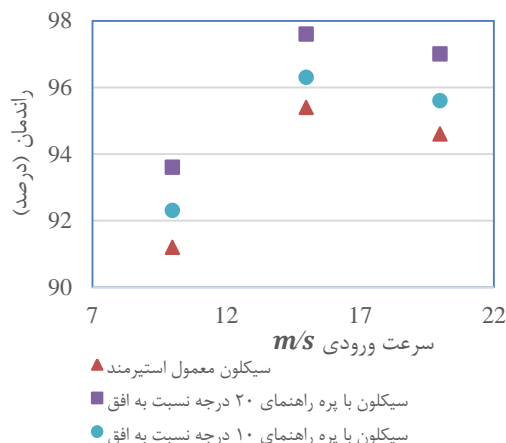
برای بررسی راندمان جداسازی سیکلون آزمایش‌هایی روی سیکلون معمول و سیکلون‌های جدید انجام شد. آزمایش‌ها روی سیکلون در دامنه دبی ۳۶-۷۲ متر مکعب بر ساعت انجام شد. مقدار دبی غبار ورودی به سیکلون ۲ گرم بر ثانیه بوده است؛ همچنین مقدار کل پودر وارد شده به سیکلون ۸۰۰ گرم بوده است. سایز ذرات کرنات کلسیم استفاده شده در محدوده ۱۰-۲۰ میکرومتر بوده و توسط الک‌های مربوطه مش‌بندی شده‌اند. برای کاهش خطا هر آزمایش سه بار تکرار شد تا خطای حاصله کمتر از ۵ درصد شود و میانگین آنها به دست آورده شد. از روی آزمایش‌هایی

۸- علائم اختصاری

m_{tot}	وزن کل ذرات جامد وارد شده به دستگاه، kg
m_B	وزن کل ذرات جمع‌آوری شده از دستگاه است، kg
ρ_p	چگالی ذره، m^3/kg
v_i	سرعت ورودی سیال، m/s
u_1	سرعت لوله ورودی، $\frac{m}{s}$
u_2	سرعت لوله خروجی، $\frac{m}{s}$
r_i	شعاع دایره‌ای که خط مرکزی ورودی به آن مماس است، m
r_e	شعاع لوله خروجی، m
W	پهنای ورودی سیکلون، m
μ	ویسکوزیته گاز، $\frac{kg}{m.s}$
D	قطر بدنه سیکلون، m
ρ_f	چگالی گاز، kg/m^3

۹- مراجع

- [۱] جعفری فشارکی پ (۱۳۸۸) آشنایی با طراحی سیستم‌های تهویه صنعتی و تصفیه‌کننده‌های هوا. انتشارات فن‌آوران، تهران.
- [2] Altmeyer S, Altmeyer Mathieu V, Jullemier V, Contal P, Midoux N, Rode S, Leclerc JP (2004) Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software. Chem Eng Process 43(4): 511-522.
- [3] Slack M, Prasad RO, Bakker A, Boysan F (2000) Advances in cyclone modeling using unstructured grids. Trans IChemE 78(Part A): 1098-1104.
- [4] Hoffmann AC, Stein LE, Bradshaw P (2003) Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation. Appl Mech Rev 56(2): B28-B29.
- [5] Bernardo S, Mori M, Peres AP, Dionísio RP (2006) 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles. Powder Technol 162: 190-200.
- [6] Safikhani H, Shams M, Dashti S (2011) Numerical simulation of square cyclones in small sizes. Adv Powder Technol 22: 359-365.



شکل ۱۳- مقایسه کلی راندمان جداسازی سیکلون‌های مورد بررسی

راندمان سیکلون معمول دارد و در تمامی سرعت‌های تست راندمان نسبت به سیکلون معمول افزایش یافته است. راندمان در این مدل از سیکلون نسبت به سیکلون با پره‌راهنما ۱۰ درجه در سرعت مطلوب ۱۵ متر بر ثانیه ۱/۳ درصد بهبود پیدا کرده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر افزودن پره‌های راهنما به دیواره گرداب‌یاب آبروسیکلون بر افت فشار جریان و راندمان جداسازی ذرات بصورت تجربی بررسی شد. افت فشار سیکلون با پره‌راهنمای ۱۰ درجه نسبت به افق در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۳۲ درصد کاهش یافته است و به طور متوسط در سرعت‌های ۱۰ الی ۲۰ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به سیکلون معمول ۲۳ درصد کاهش یافته است. در آبروسیکلون با پره‌راهنمای ۲۰ درجه نسبت به افق، افت فشار سیکلون موردنظر در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۶۴/۷ درصد کاهش یافته و به طور متوسط در سرعت‌های ۱۰ الی ۲۰ متر بر ثانیه افت فشار نسبت به سیکلون معمول ۵۸ درصد کاهش یافته است. از سوی دیگر، راندمان سیکلون با پره‌راهنمای ۱۰ درجه نسبت به افق در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۱ درصد افزایش یافته و راندمان سیکلون با پره‌راهنمای ۲۰ درجه نسبت به افق در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۲/۳ درصد افزایش یافته است. می‌توان به صورت کلی نتیجه گرفت با افزایش زاویه پره‌ها افت فشار به طور قابل توجهی کاهش یافته و راندمان اندکی بهبود می‌یابد.

جریان دو فازی گاز و قطره. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۵۳-۴۵: ۴۸(۲).

[14] Vahedi SM, Parvaz F, Rafee R, Khandan Bakavoli M (2018) Computational fluid dynamics simulation of the flow patterns and performance of conventional and dual-cone gas-particle cyclones. *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 5(1): 27-38.

[15] Zhou LX, Li RX, Qiu Hung XQ (1990) A new technology to reduce the pressure drop of a cyclone separator. *The Second World Congress of particle Technology*, Kyoto, Japan.

[16] Fayed M, Otten L (2013) *Handbook of powder science & technology*. Springer Science & Business Media.

[17] Towler G, Sinnott R (2012) *Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design*. Elsevier.

[18] Gerhart PM, Gerhart AL, Hochstein JI (2018) *Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics*. 8th edn. John Wiley & Sons.

[19] Holman, JP (2001) *Experimental methods for engineers*. 7th edn. MCGraw Hill, Singapore.

[۲۰] اخباری فر س (۱۳۸۸) جداسازی غبار بوسیله سیکلون جریان برگشتی و جت پرتاب کننده ذرات. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت، تهران.

[7] Qiu Y, Deng B, Nyung Kim C (2012) Numerical study of the flow field and separation efficiency of a divergent cyclone. *Powder Technol* 217: 231-237.

[8] Zhao B, Su Y, Zhang J (2006) Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chem Eng Res Des* 84: 1158-1165.

[9] Zhou F, Sun G, Han X, Zhang Y, Bi W (2018) Experimental and CFD study on effects of spiral guide vanes on cyclone performance. *Adv Powder Technol* 29(12): 3394-3403.

[10] Karagoz I, Avci A, Surmen A, Sendogan O (2013) Design and performance evaluation of a new cyclone separator. *J AEROSOL SCI* 59: 57-64.

[11] Qiang L, Qinggong W, Weiwei X, Zilin Z, Konghao Zh (2020) Experimental and computational analysis of a cyclone separator with a novel vortex finder. *Powder Technol* 360: 398-410.

[۱۲] اسماعیلی م (۱۳۷۹) تعیین بازده سیکلون با جریان برگشتی و هوای فشرده در اشل نیمه صنعتی و آزمایشگاهی. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[۱۳] پرواز ف، رفعی ر و طالبی ف (۱۳۹۷) بررسی اثرات تغییر قطر لوله خروجی آئروسیکلون بر عملکرد آن در