بررسی اثر زاویه داکت ورودی بر راندمان سیکلون

کمال عابدی[1*]، طالب زارعی[2].

1- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت سیمان فارس، شیراز
2- دکتری مهندسی شیمی، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

چکیده

سیکلونها یکی از پرکاربردترین تجهیزات جداسازی ذرات معلق در پروسههای صنعتی هستند. به دلیل کاربرد وسیع سیکلونها در صنایع مختلف و اهمیت عملکرد سیکلون ها، مطالعه و بررسی آن در جهت افزایش کارایی اهمیت فراوانی مییابد. لذا اهمیت جداسازی و کاهش آلودگی ناشی از ذرات بعنوان یک مشکل زیست محیطی و صنعتی و توجه به موضوع راندمان جداسازی در سیکلونها ضرورت مییابد. از اینرو با توجه به اهمیت این پژوهش و بررسی و شناخت رفتار سیال درون سیکلون و آلودگیهای صنعتی و زیست محیطی به مطالعه عوامل موثر بر روی راندمان سیکلون و مدلسازی سیکلون پرداخته شده است. دراین پژوهش با استفاده از نرمافزار فلوئنت، راندمان نمونه واقعی از سیکلون گاز–جامد یک کارخانه سیمان شبیهسازی شده است و عملکرد جداسازی ذرات با استفاده از روش اولری-لاگرانژی و مدل آشفتگی $k\epsilon - RNG$ بررسیشدهاست. با توجه به راندمان 95% سیکلون، میزان خطای محاسباتی 3/7% میباشد.سپس بهمنظور مشاهده تاثیر زاویه داکت ورودی بر میزان راندمان جداسازی ذرات جامد، چهار سیکلون با زاویههای داکت ورودی 0، 30، 45 و 60 درجه، در شرایط عملیاتی یکسان شبیهسازی گردید. میزان راندمان ارزیابی شده حاکی از آن است که تغییر زاویه داکت ورودی به علت کاهش افت فشار، بهم خوردن جریان، اغتشاش بیشتر و بر هم زدن الگوی گردابهای در بخش استوانهای، سبب کاهش راندمان جداسازی ذرات در سیکلون میگردد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، سیکلون، راندمان جداسازی ذرات جامد، جریان دوفازی

مقدمه

سیکلونها دستگاههایی هستند که با نیروی گریز از مرکزی که در اثر گاز ورودی به علت شکل دستگاه تولید میشود ذرات جامد یا مایع را از گاز جدا میکند. گاز وارده به سیکلون به علت نیروی گریز از مرکز گاز در داخل آن چرخش پیدا میکند و از دهانه خروجی خارج میشود ولی ذرات بزرگتر به علت بیشتر بودن وزن و نیرو مومنتوم نمیتواند همراه گاز چرخش کنند و با برخورد به دیواره رسوب میکنند.

-سیکلون داری 5 قسمت اصلی به شرح زیر است:

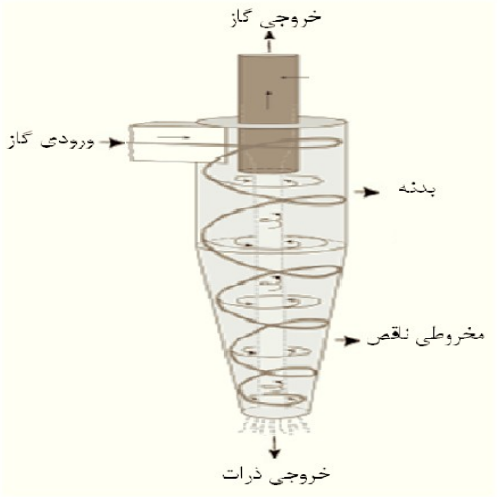
1- بدنه: استوانه ای شکل بوده و قطر آن از 10 میلیمتر در آزمایشگاهها تا 5000 میلیمتر در کارخانجات و صنایع متغیر است.

2- مخروطی ناقص: این قسمت در دنباله استوانه قرار میگیرد شیب مخروطی به شکلی است ذرات از دیواره آن به سوی پایین سر بخورند شیب مناسب 7تا8درجه نسبت به بدنه ی اصلی میباشد.

3- قسمت ورودی گاز

4- قسمت خروجی گاز

5- قسمت خروجی ذرات: این قسمت در انتها مخروط قرار گرفته و طـوری ذرات را به خارج هدایت میکند که هوا به داخل سیکلون نفوذ نمی کند. [1]



قسمت های اصلی ساختمان یک سیکلون

عوامل موثر بر روی راندمان سیکلون ها

متغیرهای زیادی در عملکرد سیکلون تـاثیر دارند که شـامل مشخصـههای گـاز و ذره و هندسه سیکلون میشود.

مشخصات گاز عبارتند از: دما، فشار، ترکیب گاز

مشخصات ذره شامل: اندازه، توزیع اندازه، شکل، دانسیته، غلظت

مشخصـات هندسی شـامل: داکت وروردی، داکت خـروجی، هندسه کلی سـیکلون، هندسه مخروط

وقتی دمای گاز افزایش یابد، دانسیته کم میشود ولی ویسکوزیته افـزایش مییابد اما با این حـال مقـدار دانسـیته گـاز نسـبت به دانسـیته ذره نـاچیز است و اثر چنـدانی در رانـدمان سیکلون ندارد. دمای بالا سرعت ورودی و سرعت ذره را به سوی دیواره را افزایش میدهد و افزایش ویسکوزیته باعث کاهش سرعت ذره به سمت دیواره میشود اثر ویـژه دما در دمـای 40 تا 700 فارنهـایت معمـولا ثـابت است. در دمـای بـالاتر از 1000 فارنهـایت ویسـکوزیته افـزایش مییابد و بـاعث کـاهش رانـدمان میشـود. تـرکیب گـاز هم میتواند بر دانسـیته و ویسکوزیته نیز اثر گذارد. وجود نشتی در سیکلونها موجب کاهش راندمان آن میگردد. اندمان سیکلون با افت فشار و سرعت ورودی تعیین میشود. افت فشار با تغییـر قطر بدنه و مـیزان جریان حجمی افزایش یا کاهش مییابد. [2]

افزایش ابعاد سیکلون باعث افزایش افت فشـار در داخل آن میشـود. و نـیز افـزایش ابعاد سـیکلون بـاعث افـزایش بـازده آن در جمع آوری ذرات میشـود. [3] بهینه تـرین نسـبت ارتفـاع سـیلندر به قطر سـیکلون 5/1و نسـبت ارتفـاع داکت خـروجی به قطر سـیکلون 5/0 میباشد. [4] تعداد دهانههای ورودی جریـان، قطر و امتـداد دهانه خـروجی جریـان و خـروجی ذرات بر روی راندمان جداسازی موثر بوده و سـیکلون با یک ورودی دارای رانـدمان بیشـتری میباشد و با کوچک کردن دهانه خروجی راندمان مطلوب تر میگردد و با افـزایش طـول دهانه خروجی به درون سیکلون عملکرد سیکلون بهتر میگردد و همچنین با کاهش بخش مخـروطی شکل نسبت به بخش استوانه ای شکل میتـوان دارای رانـدمان بیشـتری در جداسـازی ذرات سیکلون داشت. [5]با افزایش قطر ذرات و افـزایش عـدد چـرخش، مـومنتم وارده به ذرات افـزایش یافته که این امر بـاعث میشـود ذرات با گـام بیشـتر به جـداره سـیکلون نزدیک و راندمان افزایش یابـد. [6]با افـزایش سـرعت مماسـی، نـیروی گریز از مرکز وارده به ذرات بیشتر گردیـده و در نتیجه رانـدمان جداسـازی افـزایش مییابـد. [7]با افـزایش دبی ورودی به سیکلون و افزایش قطر ذرات رانـدمان جداسـازی افـزایش مییابد و نـیز با کـاهش قطر بدنه

اصلی و داکت خروجی مقدار راندمان جداسازی در قطر ثابت ذرات بیشتر میگردد. [8]با افزایش دبی ورودی میزان راندمان نیز افزایش پیدا میکند زیرا با افزایش سرعت در ورودی، سرعت مماسی و محوری در جداساز افزایش پیدا کرده و موجب بهبود در راندمان میشود. [9]با افزایش طول مخروط در سیکلون ها افت فشار و در نتیجه راندمان جداسازی به میزان کمی افزایش میابد و نیز ورودی دوطرفه پیچشی جدید افت فشار را نسبت به ورودیهای معمولی به میزان چشمگیری کاهش میدهد. افت فشار یکی از پارامترهای مهم برای انتخاب سیکلون میباشد افت فشار با هزینه انرژی رابطه مستقیم دارد معمولا راندمانهای جمع آوری بالاتر سبب افت فشارهای بیشتر میشوند. [10]بازده سیکلون به عنوان تابعی از اندازه ذرات است. بطور کلی راندمان سیکلون با افزایش عواملی نظیر: اندازه ذرات و دانیسته، سرعت مجرای ورودی، طول بدنه سیکلون، تعداد گازهای چرخش کننده در سیکلون، نسبت قطر بدنه به قطر داکت خروجی گاز، گرد و صافی دیواره داخلی سیکلون افزایش میابد. بازده سیکلون با افزایش ویسکوزیته گاز، قطر بدنه، قطرلوله خروجی گاز، ناحیه مجرای ورودی گاز و دانسیته گاز کاهش خواهد یافت. [11]

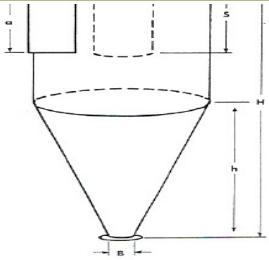
الساید و همکاران (2010) نشان دادند که ابعاد داکت ورودی و خروجی تاثیر بسزایی در میزان بازدهی سیکلون دارد.[12] چوا و همکاران (2006) با بررسی تاثیر ابعاد مخروط سیکلون بر بازده آن، بهاین نتیجه رسیدند که کاهش ابعاد این مخروط موجب افزایش بازده سیکلون در جمع آوری ذرات معلق و افزایش ناچیز افت فشار در آن میشود[13]. وینفیلد و همکاران (2013) به بررسی تاثیر تعداد داکتهای ورودی به سیکلون پرداختند. آنها دریافتند که افزایش تعداد داکتهای ورودی به میزان 3عدد تاثیر زیادی بر کاهش افت هد سیکلون دارد[14]. زو و همکارانش(2000) تاثیرات تغییر قطر بدنه سیکلون، قطر مجرای خروج گاز، و ارتفاع سیکلون بر بازده جداسازی را بررسی نمودند که نتیجه آن حاکی از بالا رفتن راندمان با افزایش ارتفاع سیکلون است[15]. زیانگ و همکارانش (2001) اثرات ابعاد بخش مخروطی و سرعت ورودی را بر عملکرد سیکلون مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند که در این بررسی با کاهش اندازه مخروط سیکلون، بازده آن بالا میرود[16]. میسوشین و همکاران (2005) به بررسی اثرات ابعاد مجرای خروجی بر عملکرد سیکلون بصورت عددی و تجربی پرداختند[17]. بایرامی و همکاران [18]، شکلا و همکاران[19]، صفی خانی و همکاران [20]ـ نیز با شبیه سازی سیکلونها به نتایج خوبی جهت افزایش راندمان آن دست یافتند. با توجه به مسائل زیست محیطی برخی صنایع شیمایی همانند صنعت سیمان و نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع غذایی و نیز از طرفی اهمیت جداسازی ذرات در این صنایع استفاده از سیکلونها به عنوان جدا کننده گردو غبار از جریان گاز بصورت مجزا و یا قبل از ورود گاز به داخل الکتروفیلتر و با عنایت به رفتار پیچیده سیال در داخل سیکلون، بررسی دقیق تر این مسئله از دیدگاه هیدرودینامیکی ضروری به نظر میرسد زیرا میزان بازدهی و کارایی یک سیکلون با توجه به مکانیزم آن تابع پارامترهای بهره برداری و هندسه سیکلون میباشد که با اشراف کامل در مدل سازی هیدرودینامیک سیال، میتوان نسبت به افزایش بازدهی سیکلون اقدام کرد.

مدلسازی هندسی سیکلون

با توجه به اهمیت موضوع راندمان جداسازی در سیکلون ها و کاربرد وسیع سیکلون در صنایع سیمان در اینجا یک نمونه واقعی از سیکلون گاز-جامد متعلق به پیشگرمکن یک کارخانه سیمان مدلسازی گردیده و رفتار سیال درون آن با تغییر در زاویه داکت ورودی بررسی شده است.

تولید هندسه و شبکه

هندسه سه بعدی سیکلون در محیط Gambit تولید و سپس مشبندی شده است. در مشبندی از مشpolyhederal استفاده گردیده است و تعداد مشها برابر71866سلول میباشد.
در شکل1 هندسه یک سیکلون جداکننده رسم شده و در جدول 1 ابعاد هندسه سیکلون شبیهسازی شده قید شده است.

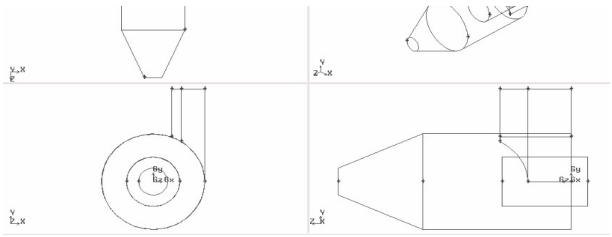


شکل1- هندسه یک سیکلون جداکننده

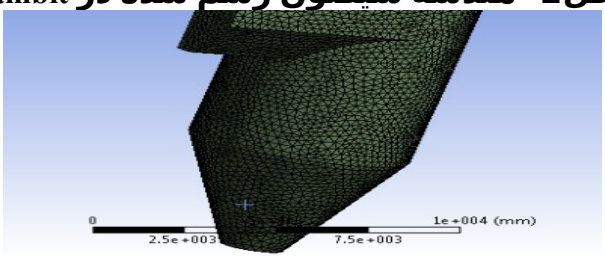
جدول 1- ابعاد هندسه شبیهسازی شده بر حسب متر

قطر سیکلون، D	30/6
قطر داکت خروجی، De	2/3
طول داکت خروجی، S	15/4
طول کلی سیکلون، H	14
قطر خروجی ذرات، B	6/0
ارتفاع مقطع ورودی، a	3/4
عرض مقطع ورودی، b	2
ارتفاع مخروطی سیکلون، h	5

در شکلهای2 و 3 هندسه سیکلون رسم شده و هندسه مش بندی شده سیکلون نمایش داده شده است.



شکل2- هندسه سیکلون رسم شده در Gambit



شکل3- هندسه مش بندی شده سیکلون

شرایط مرزی

شرایط مرزی ورودی، خروجی و دیواره هندسه سیکلون در جدول2 قید شده است.

جدول2- شرایط مرزی مورد استفاده

مرز	گاز	جامد

ورودی	سرعت ورودی	تزریق از سطح ورودی
خروجی	جریان خروجی	فرار
دیواره	عدم لغزش	انعکاس

شرایط ورودی و پارامترهای بهره برداری سیکلون در جدول 3 آمده است.

جدول3- پارامترهای بهره برداری سیکلون

فاز گاز		فاز جامد	
نوع گاز ورودی	گازهای حاصل از احتراق	قطر ذرات جامد	۴۰ μm
چگالی گاز ورودی	$4/1\ kg/Nm^3$	چگالی متوسط ذرات	۲۷۵۰ kg/m³
سرعت گاز ورودی	۲۱ m/s	سرعت ورودی ذرات	۲۱ m/s

مدل توربولنسی:

در شبیهسازی سیکلونی گاز – جامد از دیدگاه اولرین – لاگرانژین استفاده شده است، در این روش فاز پیوسته از دیدگاه اولرین و حرکت و ردیابی ذرات فاز پراکنده از دیدگاه لاگرانژین مدلسازی میشوند و مقادیر متوسط بدست آمده از پراکندگی ذرات برای اطلاعات مورد نیاز برای فاز پراکنده استفاده میشود.

مدل اغتشاش مورد استفاده $k\epsilon - RNG$ می باشد، چراکهاین مدل یکی از مدلهای مناسب آشفتگی برای شبیهسازی جریانهای پیچشی یا چرخشی و نیز جهت ردگیری ذرات بهتر عمل کرده و اساس آن بر مبنای میانگین گیری معادلات ناویراستوکس میباشد.

معادلات حاکم

معادله فاز گاز

معادلات فاز گاز شامل معادله بقای جرم و معادله بقای مومنتوم میباشد که فرم کلی آن بصورت زیر میباشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho u) = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla.(\rho uu) = \nabla.\left(\tau + \rho\overline{\acute{u}\acute{u}}\right) + \rho g \qquad (2)$$

که دراین معادله u بردار سرعت، t زمان، ρ دانسیته، g شتاب گرانش، τ تانسون تنش میباشد.

مدل لاگرانژی حرکت ذره:

جریان ذرات در داخل فاز پیوسته سیال بوسیله دنبال کردن تعداد کمی از ذرات در سیال پیوسته بررسی میشود. نیروی درگ وارد شده به ذرات به صورت جدای از هم بررسی شده و اثر بین ذرات و اثر فاز ذرات بر فاز گاز، در نظر گرفته نمیشود. بنابراین معادله حاکم بر ذرات، معادله مومنتوم میباشد که تغییر سرعت ذرات با توجه به قانون دوم نیوتن محاسبه میشود.

$$m\frac{du}{dt}\ F= \qquad (3)$$

که دراین رابطه F نیروی وارد بر ذره، m جرم ذره و u سرعت ذره میباشد. مهمترین نیروی وارد بر ذره همان نیروی درگ است که از طرف فاز گاز به طور پیوسته بر ذره وارد میشود و برابر است با:

$$F_D = \frac{1}{8}\pi d^2 \rho C_D |V_R| V_R \qquad (4)$$

کهCD از رابطه زیر بدست میآید.

$$C_D = \frac{24(1+0.15Re^{0.687})}{Re} \qquad (5)$$

و عدد رینولدز ذره هم برابر است با:

$$Re = \frac{\rho |V_R| d}{\mu} \qquad (6)$$

که d قطر ذره، ρ, μ هم ویسکوزیته و دانسیته فاز گاز و VRسرعت نسبی دو فاز است.

تجزیه و تحلیل نتایج:

سیکلون با شبکه polyhederal مشبندي شد کهاین مش ساختار یافته باعث کاهش زمان محاسباتی گردید. همچنین نتایج بدست آمده برای راندمان جداسازی برای سه دانسیته مش مختلف با اندازه مش 14344، 71866 و 83526 سلول مقایسه گردید و مطابق نتایج بدست آمده دراین قسمت سیکلون با دانسیته مش 71866 سلول به عنوان مش استاندارد انتخاب شده است. جدول4 نتایج بدست آمده برای راندمان جداسازی برای سه دانسیته مش مختلف را نشان میدهد.

جدول4- نتایج بدست آمده با سه دانسیتههای متفاوت مش

شبکه	سلول	راندمان جداسازی	% خطا
Polyhederal	14344	77%	19 %
Polyhederal	71866	88%	3/7 %
Polyhederal	82143	90%	3/5 %

شبیه سازی در نرم افزار فلوئنت صورت گرفته است. محاسبات در یک سیستم 3 هستهای، CPU 2.40 GHz، RAM 4 GB انجام شده است.

اعتبارسنجی:

دراین تحقیق برای اعتبار سنجی، از شرایط و پارامترهای اندازهگیری شده در دپارتمان کوره ی یک کارخانه سیمان استفاده گردید و با توجه به موازنه جرم سیستم پخت و

راندمان 95% سیکلون، میزان خطای محاسباتی 3/7% میباشدکه مـیزان خـوبی جهت ارائه نتایج میباشد.

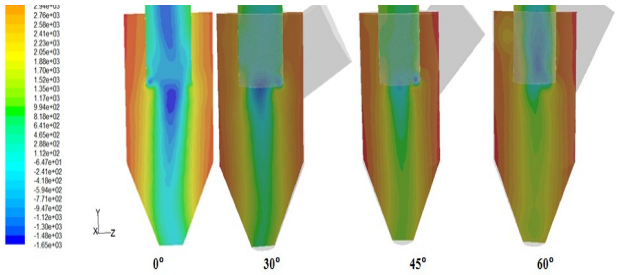
بررسی تاثیر زاویه داکت ورودی بر میزان راندمان جداسازی ذرات در سیکلون

نتایج حاصل از شبیهسازی سیکلونها با زاویههای داکت ورودی 0، 30، 45 و 60 درجه نشان میدهد که با تغییر زاویه داکت ورودی مـیزان راندمان جداسـازی ذرات کـاهش مییابـد. درجدول(5) میزان راندمان هر یک از سیکلونها بر اساس زاویه داکت ورودی گزارش گردیده است.

جدول5- میزان راندمان سیکلونها

زاویه داکت ورودی	راندمان جداسازی
0	88%
30	45%
45	32%
60	56%

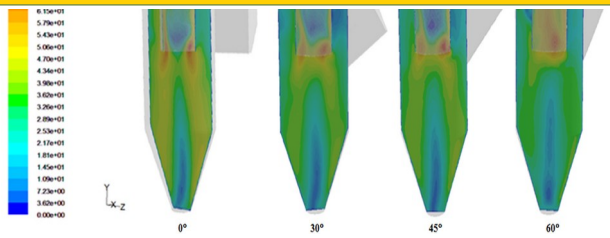
کانتورهای فشار:



شکل4- کانتورهای فشار سیکلون ها

با توجه به شکلهای 4 مشـاهده میگـردد که با افـزایش زاویه داکت ورودی افت فشـار کاهش یافته است و نیز افـزایش زاویه داکت ورودی مـوجب بهم خـوردن جریـان و اغتشـاش بیشتر و بر هم زدن الگوی گردابهای در بخش اسـتوانهای سـیکلون گردیـده که سـبب کـاهش راندمان شده است. همچنین این زاویه باعث هـدایت سـیال همـراه با ذرات جامد به نـزدیکی دهانه داکت خروجی میگردد که تاثیر آن کاهش راندمان خواهد بود. در سیکلون با زاویه داکت ورودی60 درجه با توجه به افـزایش فشـار در قسـمت پـایینی سـیکلون و کـاهش فشـار در ورودی لوله خروجی، راندماناین سـیکلون نسـبت به سـیکلون با زاویه داکت ورودی 45درجه افزایش داشته است.

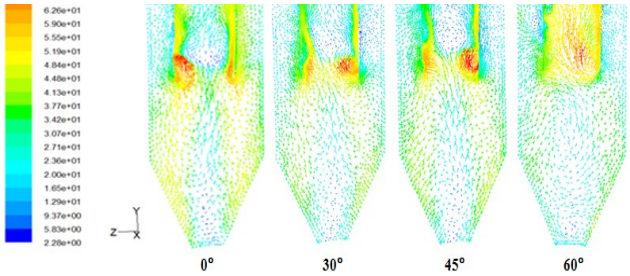
کانتورهای سرعت



شکل5- کانتورهای سرعت سیکلون ها

با مقایسه کانتورهای سرعت سیکلونها در شکل5، مشاهده میگردد که سرعت نزدیک به جدارهها کاهش یافته است که این امر موجب چرخش کمتر سیال و کاهش نیروی وارد بر ذرات میشود و نیزحرکت و برخورد ذرات به سمت جداره کمتر شده است و در نتیجه راندمان و ریزش مواد از جداره به سمت محفظه جمع آوری کاهش یافته است.

بردارهای سرعت:

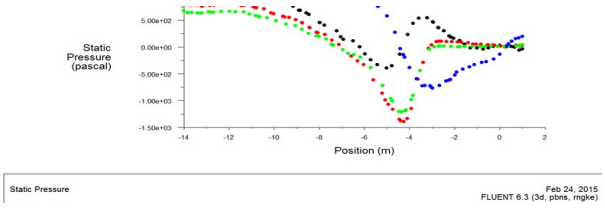


شکل6- بردارهای سرعت سیکلون

با توجه به شکل6 مشاهده میگردد که در دهانه داکت خروجی سرعت افزایش داشته است. ولی افزایش زاویه داکت ورودی موجب بهم خوردن جریان، اغتشاش بیشتر، بر هم زدن الگوی گردابه ای و ایجاد جریان برگشتی در بخش استوانهای سیکلون شده است که این امر سبب میشود ذرات بیشتر در بخش استوانه ای همراه با گاز از دهانه خروجی خارج شوند و راندمان کاهش یابد.

نمودار فشار استاتیکی بر روی خط مرکزی سیکلون

با توجه به شکل ۷ و مشاهده فشار استاتیکی سیکلونها بر روی خط مرکزی سیکلونها ملاحظه میگردد که بیشترین فشار مربوط به قسمت انتهایی و کمترین فشار در ابتدای دهانه خروجی میباشد.



شکل7- مقایسه نمودار فشار استاتیکی سیکلونها بر روی خط مرکزی

نتیجه گیری:

نتایج حاصل از شبیهسازی سیکلونها با زاویههای داکت ورودی 0، 30، 45 و 60 درجه نشـان میدهد که با تغیـیر زاویه داکت ورودی به علت کـاهش افت فشـار مـیزان رانـدمان جداسازی ذرات کاهش مییابد. همچنیناین امر موجب بهم خوردن جریـان، اغتشـاش بیشـتر و بر هم زدن الگـوی گردابهای یا چرخشی در بخش اسـتوانهای و کـاهش رانـدمان میگـردد. همچنیناین زاویه بـاعث هـدایت سـیال همـراه با ذرات جامد به نـزدیکی دهانه داکت خـروجی میگردد که تاثیر آن کاهش راندمان خواهد بود.

مراجع

[1]جعفری فشارکی، پ.(1388)، " آشنایی با سیستمهای طـراحی تهویه صـنعتی و تصـفیه کنندههای هوا"، انتشارات فن آوران، تهران.

[2] Theodore Louis.(2008), “Air Pollution Control Equipment Calculations”. John Wiley & Sons, pp 361.

[3] Azadi, M. and Azadi, M. and Mohebbi, A.(2010), “A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters”, pp 835–841.

[4] Chu, K.W. and Wang, B. and Xu, D.L. and Chen, Y.X. and Yu, A.B.(2011). “CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator”, pp 834-847.

[5]بهـداد، م. و دیگـران.(1392)، "بررسی عـددی تـاثیرات هندسی سـیکلون بر رانـدمان جداسازی ذرات"، دومین همایش ملی انرژیهای نو و پاک، همدان، شـرکت هم اندیشـان محیط زیست فردا.

[6]بهاری، ع. و دیگران.(1391)، "بررسی عددی مدلهای مختلف توربولنسی و اثرات آنها بر جـدایش ذرات در سـیکلون"، اولین کنفـرانس بین المللی صـنعت سـیمان، انـرژی و محیط زیست، تهران، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران.

[7] مسیحی، م. و دیگران.(1392)، "بررسی و شبیهسازی عددی سیکلون گاز- جامد جهت حفاظت از محیط زیست و انرژی با استفاده از CFD"، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه تـرویجی دوسـتداران محیط زیست.

[8] خزایی، ا. و دیگران.(1389)، "بررسی عددی اثرات دبی ورودی و قطر بدنه سیکلون بر جـدایش ذرات در جداکننـدههای سـیکلونی"، هجـدهمین کنفـرانس سـالانه مهندسی مکانیـک، تهران، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شریف.

[9]اخلاقی، م. و دیگـران.(1393)ـ "مطالعه آزمایشـگاهی و شبیهسـازی CFD جداسـاز سیکلونی جریان محوری (I-Sep) و بررسی تأثیر دبی ورودی بر رانـدمان جداسـازی"، پنجمین کنفرانس ملی کاربرد CFD در صنایع شیمیایی و نفت، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[10] بازوند، ا. و دیگران.(1389)، "بررسی تجربی افت فشار در سیکلون گاز- جامد"، دومین همایش ملی تهویه صنعتی و بهداشتی، تهران، دانشگاه شریف، دانشکده مکانیک.

[11] Cheremisinoff, Nicholas.(2002), “Handbook of air pollution prevention and control”Butterworth-Heinemann.

[12] Elsayed, kh. and Lacor, ch.(2010), “Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations”, pp 6048-6058

[13] Chuah, T,G. and Gimbun, J. and Choong, Thomas S.Y.(2006), “A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics”, pp 126 – 132.

[14]Winfield, D. and Cross, M. and Croft, N. and Paddison, D. and Craig, I.(2013). “Performance comparison of a single and triple tangential inlet gas separation cyclone:A CFD Study”, pp 530-531.

[15] Zhu, Y. and Lee, K.W.(1999). “Experimental study on small cyclones operating at high flow rates” , Journal of aerosol science, Vol. 30, n 10, pp 1303-1315.
[16] Rongbiao Xiang, S.H. Park, K.W. Lee.(2001), "Effects of cone dimension on cyclone performance", Journal of Aerosol Science, Vol.32, pp 549-561.
[17] Mi-Soo Shin, Hey-Suk Kim, Dong-Soon Jang.(2005), “A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments”, Applied Thermal Engineering, Vol.25, pp1821-1835.
[18] بایرامی، ب و دیگران.(1393)، "شبیهسازی سیکلون 5 پیش گرمکن کارخانهي 3600 تنی سیمان بجنورد با استفاده از دینامیک سیالاتی محاسباتی"، *سومین همایش ملی فناوریهای نوین شیمی و مهندسی شیمی*، قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان.
[19]Shukla, S.K. and Shukla, P. and Ghosh, P.(2013), “The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators”, pp 5774-5789.
[20]Safikhani, H. and Hajiloo, A. and Ranjbar, M.A.(2011), “Modeling and multi-objective optimization of cyclone separators using CFD and genetic algorithms”, pp 1064-1071.