بررسی پارامترهای عملکرد یک سیکلون جداکننده جامد-گاز با مدل‌های مختلف آشفتگی

حسن داور[1] | **امین رضا نقره آبادی** | **پویان محسنی بهبهانی**

[1]مربی-گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی رامهرمز
Hassan.Davar@gmail.com

استادیار-گروه مکانیک دانشگاه چمران
A.R.Noghrehabadi@scu.ac.ir

مربی- گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان،
Pouyan_Mohseni@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش تاثیر پارامتر سرعت بر افت فشار سیکلون و قطر ذرات بر بازده سیکلون با حدود ۱۳۰۰۰۰۰ المان بصورت با سازمان تهیه شده است. برای ایجاد کوپل میان معادلات پیوستگی و ممنتوم از الگویتم سیمپل استفاده شده است. پروفیل‌های سرعت در جهت‌های y و z جریان در دو مقطع سیکلون با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG k-ε، k-ε استاندارد۲۱ و k-ε تحقق‌پذیر۲۲ محاسبه شده‌اند و به‌همراه نتایج تجربی موجود مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین نشان داده شد با افزایش سرعت ورودی، افت فشار سیکلون به علت بیشتر شدن شدت آشفتگی و ایجاد جریان‌های چرخشی قوی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص شد که مدل RNG k-ε مرتبه دوم در پیش‌بینی پروفیل‌های سرعت از دقت بالاتری نسبت به بقیه مدل‌های k-ε برخوردار است.

کلمات کلیدی: سیکلون گازی- RNG k-ε – k-ε استاندارد - افت فشار

مقدمه

مطالعه و تحقیق در مورد جداسازی ذرات از یک جریان، به ویژه ذرات جامد از جریان گاز، مبنای مهمی در طراحی و فرآیندهای صنعتی به شمار می‌رود. یکی از عمده‌ترین وسایلی که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیکلون‌ها می‌باشند. سیکلون‌ها از تعداد قطعات کمی تشکیل شده‌اند که عبارت‌اند از: ورودی گاز، خروجی گاز، استوانه بیرونی، مخروط ناقص و محفظه برای جمع-آوری گرد و غبار. گاز وارد استوانه بیرونی شده و در یک مسیر حلقوی به حرکت خود ادامه می‌دهد. گاز در حال چرخش مواد سنگین‌تر را به سمت دیواره‌های سیکلون پرتاب می‌کند. نزدیک دیواره به علت وجود اصطکاک سرعت گاز کم می‌باشد، و موادی که به سمت دیواره پرتاب شده‌اند در یک جریان با سرعت کم به دام می‌افتند و تحت تاثیر نیروی جاذبه زمین به سمت پایین کشیده می‌شوند [۱]. گاز بدون مواد اضافه در یک مسیر مارپیچ به سمت بالا حرکت کرده و از سیکلون خارج می‌شود. به علت غلظت حجمی کم ذرات معلق نسبت به گاز حامل، حرکت ذرات معلق تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی حرکت سیال نخواهد داشت، بنابراین حرکت هر کدام از فازها را می‌توان به صورت جداگانه بررسی کرد. به این صورت که ابتدا حرکت سیال، بدون حضور ذرات جامد معلق بررسی می‌شود و سپس با استفاده از نتایج این بخش حرکت ذرات معلق برای به‌دست آوردن نیروهای وارد بر ذرات شبیه سازی می‌شود [۲]. در روش‌های تجربی با استفاده از روش‌های لوله‌های ضربه[۳]، سیم‌های داغ الکتریکی و کاربرد لیزر[۴] توزیع پراکندگی ذرات در سیکلون‌ها اندازه گرفته می‌شوند که استفاده از این وسایل بسیار وقت‌گیر و هزینه آنها هم بسیار بالاست [۳]. اولین شبیه‌سازی‌های تقارن محوری توسط بویسان و همکاران صورت گرفت که به علت محدودیت مربوط به دوبعدی بودن هندسه سیکلون، نتایج آنها قابل اعتماد نیست [۴،۵]. تحقیقاتی بر روی الگوی جریان گاز در سیکلون‌هایی که بیشترین مقدار سرعت محوری آنها در مرکز سیکلون به وجود می‌آید، صورت گرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهش‌های صورت گرفته توسط هوکسترا و همکاران [۶] بر اساس مدل‌های RNG k-□ و k-□ استاندارد و شلبی [۷] نیز اشاره کرد. همچنین یک تحقیق تجربی و عددی بر روی یک سیکلون راندمان بالا در دمای بالا و محیط تحت فشار توسط شین[۵] و همکاران [۸] صورت گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزایش فشار باعث افزایش بازده جداسازی سیکلون و افزایش دما باعث کاهش بازده جداسازی سیکلون می‌گردد. همچنین نشان داده شد که افزایش دما و فشار نیز بیشترین تاثیر را روی بازده مجموعه ذرات کمتر از ۱۰ میکرومتر می‌گذارد. یک سیکلون ورودی مماسی و تخلیه گرد و غبار محوری توسط فراسر و همکاران [۹] و کانیگ [۱۰] بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی تجربی مبنای مقایسه نتایج کار عددی حاضر نیز می‌باشد. در این مقاله پروفیل‌های سرعت در جهت y و سرعت در جهت z در یک سیکلون سه بعدی به روش‌های عددی توسط مدل‌های مختلف آشفتگی با نتایج تجربی مقایسه شدند. همچنین تاثیر پارامتر سرعت بر افت فشار سیکلون و قطر ذرات بر بازده سیکلون مورد بررسی قرار گرفت.

Standard ۱
Realizable ۲

Impact Tubes ۳
Laser Doppler ٤
Mi-Soo Shin-٥

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.6.7]

۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان گاز در یک سیکلون، معادلات پیوستگی و ممنتوم هستند که در یک سیستم مختصات غیرشتابدار، برای حالت پایدار، در یک جریان غیرقابل تراکم بدین صورت نوشته می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_i\right)=0 \qquad (۱)$$

$$\rho\frac{\partial}{\partial x_j}\left(u_i u_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \qquad (۲)$$

این معادلات دارای شکل کلی معادلات ناویر استوکس هستند، که با متوسط گیری زمانی این معادلات جمله اضافی تنش‌های رینولدز به سمت راست معادله افزوده شده است. برای بستن دستگاه معادلات فوق باید تنش‌های رینولدز به روش صحیحی مدل گردند. یک روش متداول استفاده از روش بوزینسک[۶] است که تنش‌های رینولدز را به گرادیان سرعت متوسط مربوط می‌کند و به عنوان مثال این شیوه در مدل RNG k-ε استفاده شده است [۱۱]:

$$-\rho\overline{u_i' u_j'}=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\delta_{ij} \qquad (۳)$$

روش حذف مقیاس در مدل RNG k-ε منجر به معادله دیفرانسیل زیر، برای ویسکوزیته مغشوش می شود:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3-1+c_\nu}}d\hat{\nu} \qquad (۴)$$

که $\hat{\nu}=\mu_{eff}/\mu$ بوده و $c_\nu \simeq 100$ می‌باشد. این معادله در نواحی با رینولدز پایین جواب بهتری نسبت به k-ε استاندارد می‌دهد و در رینولدزهای بالا تقریبا" با حالت استاندارد برابر است. سومین مدلی که در این مقاله استفاده می‌کنیم، مدل k-ε تحقق‌پذیر است [۱۲]. این مدل قیود ریاضی خاصی را بر تنش‌های نرمال اعمال می‌کند که هماهنگ با فیزیک جریان‌های آشفته است. بدین معنا که در این مدل با متغیر قرار دادن ضریب Cμ، امکان منفی شدن تنشهای نرمال، $\overline{u^2}$ و ارضاء نشدن نابرابری شوارز[۷] برای تنشهای برشی، زمانی که کرنشهای متوسط، بزرگ هستند از بین می‌رود. بدین جهت در رابطه لزجت آشفتگی مورد استفاده در این مدل، که مشابه رابطه لزجت آشفتگی در مدل استاندارد k–ε می‌باشد، ضریب Cμ ثابت نبوده و تابعی از کرنش جریان متوسط، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن است.

۳- هندسه سیکلون و شرایط مرزی

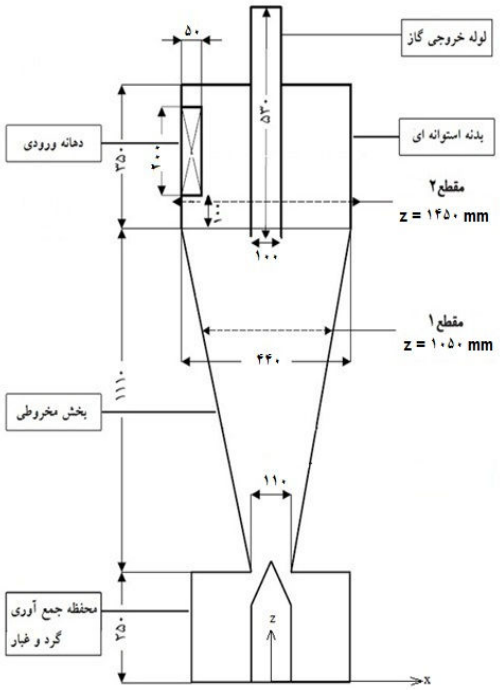
شماتیک سیکلون مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیکلون دارای یک ورودی مماسی و تخلیه گرد و غبار به صورت محوری می‌باشد. سرعت سیال در مرز ورودی سیکلون برابر ۲۰ متر بر ثانیه است. چگالی هوا برابر ۱٫۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب است و لزجت آن برابر $۱٫۷۸۹۴\times۱۰^{-۵}$ کیلوگرم بر مترثانیه می‌باشد. به‌منظور اطمینان از صحت جواب‌های خروجی نرم افزار و عدم وابستگی جواب‌ها نسبت به شبکه، پنج شبکه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پس از مقایسه فشار و سرعت در جهت z در مقاطع ۱ و ۲ سیکلون در شبکه‌های مختلف، مشخص گردید که مقادیر پارامترهای سرعت و فشار در شبکه‌ای با حدود ۱۳۰۰۰۰۰ المان، مستقل از تعداد شبکه می‌باشد. در جدول ۱ سرعت در جهت z در دو مقطع سیکلون توسط شبکه‌های مختلف نشان داده شده است. شماتیکی از ساختار شبکه‌بندی سیکلون در شکل (۲) نشان داده شده است. شرایط روی دیواره عدم لغزش بوده و به منظور در نظر گرفتن آثار گرادیان فشار بر الگوی جریان از توابع دیوار غیر تعادلی، استفاده شده است. تمامی نتایج به‌دست آمده در این بررسی بر اساس روش گسسته‌سازی درجه دوم بوده و برای ایجاد کوپل مابین معادلات پیوستگی و ممنتوم از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

سرعت محوری در مقطع ۲ (متر بر ثانیه)	سرعت محوری در مقطع ۱ (متر بر ثانیه)	تعداد سلولها
۴۰٫۸۸۴	۱۲/۷۰۱	۳۵۰۰۰۰
۴۵٫۲۳۵	۱۵/۴۰۵	۷۵۰۰۰۰
۴۵٫۷۹۶	۱۷/۳۹۳	۱۰۰۰۰۰۰
۴۵٫۸۷۳	۱۷/۸۴۳	۱۳۰۰۰۰۰
۴۵٫۹۲۳	۱۷/۹۰۲	۱۷۰۰۰۰۰

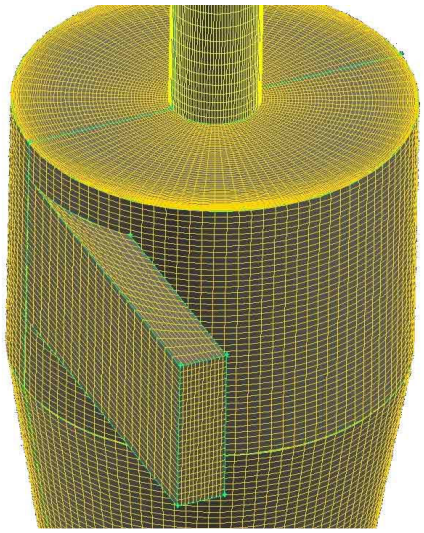
جدول ۱: سرعت در جهت z در دو مقطع سیکلون توسط شبکه‌های مختلف

۶ Boussinesq
۷ Schwarz inequality

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.6.7]



شکل ۱: شماتیکی از هندسه سیکلون (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشد) [۹]



شکل ۲: شماتیکی از ساختار شبکه بندی سیکلون

از دیگر پارامترهای مورد نیاز در تکمیل شرط مرزی، پیش‌بینی مقادیر آشفتگی در ورودی و خروجی مسئله است که از مولفه‌های شدت تلاطم و قطر هیدرولیکی استفاده شده است.

شدت تلاطم = ۳٫۶ درصد

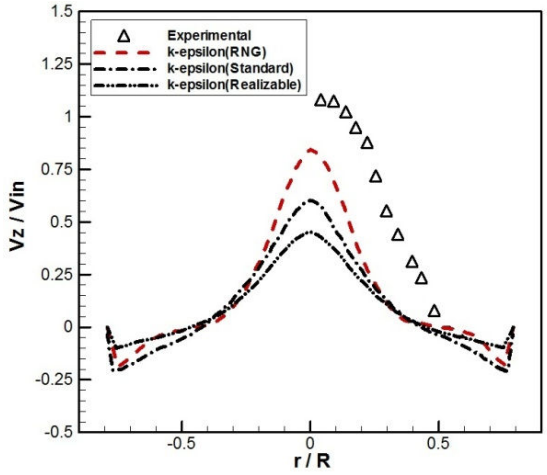
قطر هیدرولیکی = ۰٫۰۸۶۳ متر

در مورد ذرات و چگونگی ورود آن به سیستم، ذرات به گونه‌ای تزریق می شوند که در ورودی لوله مقدار و جهت سرعت ذرات با مقدار و جهت سرعت سیال برابر در نظر گرفته می‌شود. چگالی ذرات ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. قطر ذرات تزریق شده از ۰٫۵ میکرومتر تا ۱۰٫۵ میکرومتر می‌باشند.

۴- نتایج

۴-۱- توزیع سرعت در جهت y و z

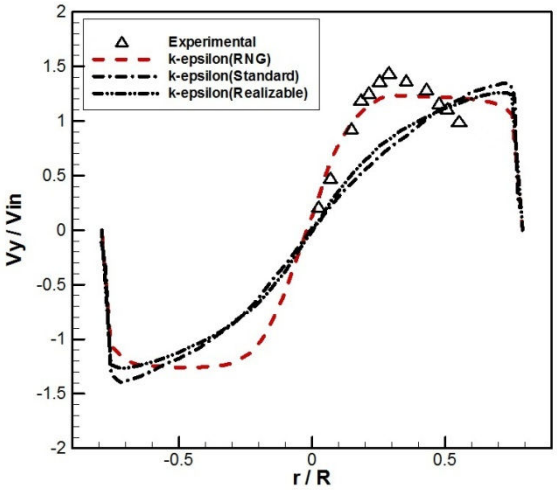
در شکل (۳) سرعت در جهت z و در z=۱۰۵۰mm برای سه مدل آشفتگی به همراه نتایج تجربی [۹] برای سرعت ورودی ۲۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. با توجه به نتایج تجربی در شکل (۳)، بیشترین سرعت محوری ۱٫۰۵ برابر سرعت ورودی و در مرکز سیکلون می‌باشد. مدل RNG بیشترین سرعت محوری را ۰٫۸۵ برابر سرعت ورودی و در مرکز سیکلون پیش‌بینی می‌کند. همچنین مقدار صفر سرعت محوری را در فاصله ۵۱ درصد شعاع از مرکز سیکلون پیش‌بینی می‌کند. مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر از دقت بالاتری برخوردار است.



شکل۳: مقایسه سرعت z در z=۱۰۵۰mm برای سه مدل آشفتگی با نتایج تجربی [۹]

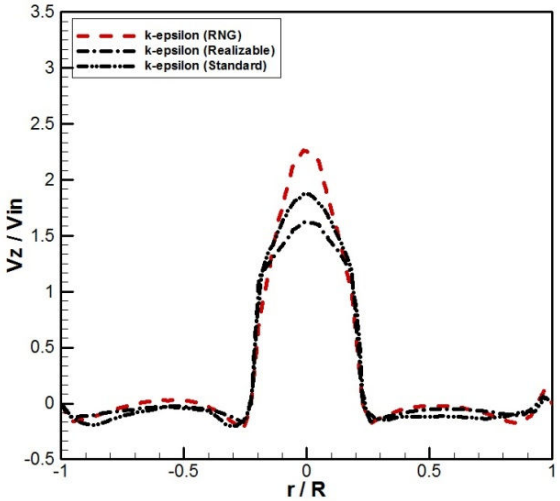
در شکل (۴) سرعت در جهت y و در z =۱۰۵۰mm برای سه مدل آشفتگی به همراه نتایج تجربی [۹] برای سرعت ورودی ۲۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. با توجه به نتایج تجربی در شکل (۴)، بیشترین مقدار سرعت در جهت y، ۱/۴ برابر سرعت ورودی و در فاصله ۲۶ درصد شعاع از مرکز سیکلون می‌باشد. مدل RNG بیشترین مقدار سرعت در جهت y را ۱/۲۵ برابر سرعت ورودی و مکان آن را نسبت به دو مدل دیگر در فاصله نزدیکتری به مرکز سیکلون پیش‌بینی می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.6.7]



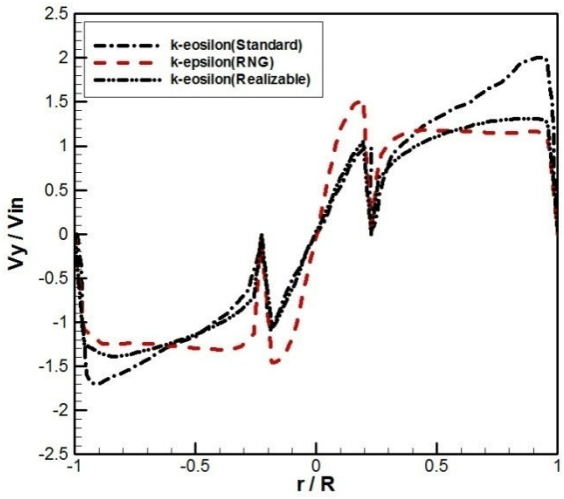
شکل۴: مقایسه سرعت برای سه مدل y در z=۱۰۵۰mm آشفتگی با نتایج تجربی [۹]

در شکل (۵) پروفیل‌های سرعت در جهت z در z=۱۴۵۰mm توسط مدل‌های مختلف آشفتگی نشان داده شده است. به‌دلیل اینکه مقطع ۲ درون قسمت استوانه‌ای و زیر کانال ورودی قرار می‌گیرد، در آنجا سرعت سیال بیشتر در جهت y و چرخشی است و مقدار سرعت در جهت z ناچیز است. همانطور که مشاهده می‌شود، در فضای میان دیواره خارجی لوله خروجی هوا و دیواره داخلی قسمت استوانه‌ای، سرعت در جهت z ناچیز است و در بیشترین مقدار خود ۰٫۲ برابر سرعت ورودی هوا می‌باشد . در قسمت درونی لوله خروجی هوا سرعت افزایش پیدا می‌کند و در مرکز لوله به بیشترین مقدار می‌رسد. مدل RNG بیشترین سرعت محوری را ۲٫۳۴ برابر سرعت ورودی و در مرکز سیکلون پیش‌بینی می‌کند. مدل استاندارد بیشترین مقدار سرعت را در مرکز لوله و ۱٫۸۸ برابر سرعت ورودی پیش‌بینی می‌کند. مدل تحقق‌پذیر نیز بیشترین مقدار سرعت را در مرکز لوله و ۱٫۶۲ برابر سرعت ورودی پیش‌بینی می‌کند.



شکل۵: مقایسه سرعت z در مقطع ۳ برای سه مدل آشفتگی

در شکل (۶) پروفیل‌های سرعت در جهت y در z=۱۴۵۰mm پیش‌بینی شده است. مقدار صفر نشانگر مرکز قطر سیکلون در آن مقطع است. مقطع ۲ به دو بخش فضای درونی لوله خروجی سیکلون و فضای بیرونی لوله خروجی سیکلون تشکیل شده است که منظور از بخش دوم، فضای میان دیواره خارجی لوله خروجی سیکلون تا دیواره داخلی قسمت استوانه‌ای سیکلون می‌باشد. مدل RNG بیشترین سرعت در جهت y را ۱٫۵۵ برابر سرعت ورودی و مکان آن را در فاصله ۱۸ درصد شعاع از مرکز سیکلون درون ناحیه داخلی لوله خروجی سیکلون پیش‌بینی می‌کند. مدل تحقق‌پذیر بیشترین مقدار سرعت را ۱٫۴۱ برابر سرعت ورودی و مکان آن را در فاصله ۸۵ درصد شعاع از مرکز سیکلون خارج از ناحیه داخلی لوله خروجی سیکلون پیش‌بینی می‌کند. مدل استاندارد نیز بیشترین سرعت را در خارج از فضای لوله خروجی سیکلون پیش‌بینی می‌کند. با توجه به این که بالاترین میزان سرعت y در قسمت درون لوله خروجی سیکلون اتفاق می افتد و همچنین طبق نتایج به‌دست آمده، مدل RNG نسبت به دو مدل آشفتگی دیگر، پروفیل‌های سرعت سیال را بهتر پیش‌بینی می‌کند. به همین دلیل در ادامه کلیه نتایج توسط مدل RNG پیش‌بینی شده است.

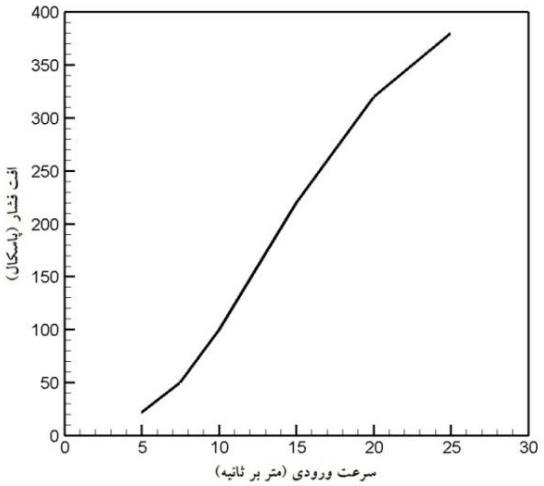


شکل۶: مقایسه سرعت y در مقطع ۳ برای سه مدل آشفتگی

۴-۲- اثر پارامتر سرعت ورودی بر افت فشار سیکلون

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیکلون‌های گازی افت فشار می‌باشد. افت فشار در سیکلون ناشی از افت در مرزهای ورودی و خروجی و همچنین افت انرژی در اثر حرکت چرخشی سیال می‌باشد. تغییرات افت فشار ورودی با تغییر سرعت ورودی جریان، در شکل (۷) نشان داده شده است. افزایش سرعت ورودی جریان باعث افزایش افت فشار جریان ورودی می‌شود. این افزایش افت فشار به علت بیشتر شدن شدت آشفتگی با افزایش سرعت ورودی و ایجاد جریان‌های چرخشی قوی در بعضی از نواحی سیکلون می‌باشد.

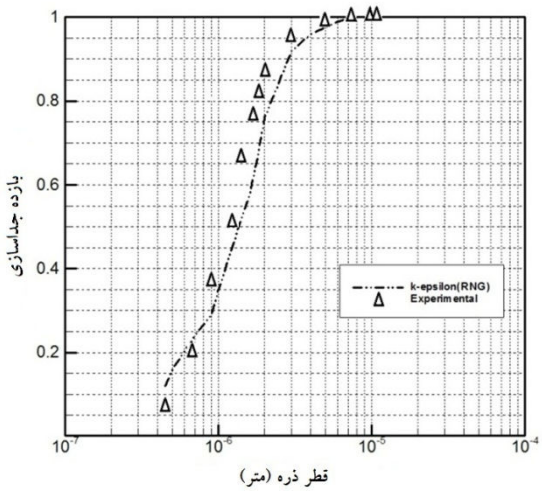
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.6.7]



شکل۷: افت فشار در سیکلون بر حسب سرعت ورودی [۱۰]

۴-۳- اثر قطر ذرات بر بازده جداسازی سیکلون

همانطور که در شکل(۸) نشان داده شده است، پس از تزریق ذرات با قطرهای متفاوت، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر ذرات در سرعت ورودی یکسان ۲۰ متر بر ثانیه، میزان بازده جداسازی ذرات در محفظه گرد و غبار سیکلون به دلیل وزن بالاتر ذرات افزایش می‌یابد. مهمترین ذره‌ای که بازده جداسازی آن دارای اهمیت است، ذره‌ای است که پس از عملیات تزریق، بازده جداسازی ۵۰ درصد برای سیکلون بدست میآید. به عبارتی حد جداسازی یک سیکلون را با این قطر که قطر جدایش نام دارد، معرفی می‌کنند. با توجه به نتایج تجربی برای تزریق ذره با قطر ۱٫۳ میکرومتر بازده جداسازی سیکلون ۵۰ درصد است.



شکل۸: مقایسه بازده جداسازی ذرات در سیکلون بر حسب قطر ذرات و نتایج تجربی [۱۰]

طبق نتایج بدست آمده توسط مدل RNG، بازده جداسازی سیکلون برای تزریق ذره با قطر ۱/۴ میکرومتر ۵۰ درصد بدست می‌آید که این تفاوت قطر ذره از خطای ۷/۷ درصدی نسبت به نتایج تجربی برخوردار است.

۵-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله پس از حل میدان جریان توسط مدل‌های آشفتگی RNG k-ε، استاندارد k-ε و تحقق‌پذیر k-ε، توانایی مدل RNG k-ε در پیش‌بینی پروفیل‌های سرعت در جهت y و z نسبت به مدل‌های استاندارد k-ε و تحقق‌پذیر k-ε نشان داده شد. همچنین تاثیر پارامتر سرعت بر افت فشار سیکلون و قطر ذرات بر بازده سیکلون توسط مدل RNG k-ε مورد بررسی قرار گرفت. افت فشار در سیکلون برای سرعت‌های ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد افزایش سرعت ورودی جریان باعث افزایش افت فشار میان مرزهای ورودی و خروجی جریان می‌شود. پس از تزریق ذرات با قطرهای متفاوت، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر ذرات در سرعت ورودی یکسان ۲۰ متر بر ثانیه، میزان بازده جداسازی ذرات در محفظه گرد وغبار سیکلون به دلیل وزن بالاتر ذرات افزایش می یابد. با توجه به نتایج بدست آمده توسط مدل RNG ، بازده جداسازی سیکلون برای تزریق ذره با قطر جدایش ۱٫۴ میکرومتر ۵۰ درصد به‌دست می‌آید که این تفاوت قطر ذره از خطای ۷٫۷ درصدی نسبت به نتایج تجربی برخوردار است.

علائم انگلیسی

p	فشار، Pa
u	مولفه سرعت در راستای شعاعی، m/s
v	مولفه سرعت در راستای دورانی، m/s
R	شعاع بدنه سیکلون، m
v_y	سرعت در جهت y، m/s
v_z	سرعت در جهت z، m/s
v_{in}	سرعت ورودی، m/s
K	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2
ε	نرخ استهلاک آشفتگی، m^4/s^3

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
ν	چسبندگی سینماتیکی، m^2/s
μ	چسبندگی دینامیکی، $N.s/m^2$

زیرنویس

i	مولفه افقی در سیستم مختصات کارتزین
j	مولفه عمودی در سیستم مختصات کارتزین

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.6.7]

مراجع

[1] Schmidt, p., "New results in cyclone-design, especially for high-pressure and temperature application", IChemE Symposium series, No. 99, pp. 67-72, 1986.
[2] Ma, L., Ingham, D.B., "Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones", Journal of Aerosol Sci, Vol. 31, No. 9, pp. 1097-1119, 2000.
[3] Smagorinsky, J., "General circulation experiments with the primitive equations", Month. Wea. Rev., Vol. 91, pp. 99–164, 1963.
[4] Boysan, F., Ayers, W.H., Swithenbank, J., "Fundamental mathematical modeling approach to cyclone design", Trans, Inst, Chem, Eng., Vol. 60, No. 4, pp. 222-230, 1982.
[5] Boysan, F., Swithenbank, J., Ayers, W.H., "Mathematical modeling of gas particle flows in cyclone separators", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 4, pp. 1307-1329, 1996.
[6] Hoekstra, A., Derksen, J., Akker, H.V.D., "An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones", Chem, Eng, Science, Vol. 86, pp. 2055-2065, 1999.
[7] Shalaby, H.H., "On the potential of large eddy simulation to simulate cyclone separators", Ph.D Thesis, Chemnitz university of technology, 2007.
[8] Shin, M.S., Kim, H.S., Jang, D.S., Chung, J.D., Bohnet, M., "A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments", Jour, Applied Thermal Engineering, Vol. 43, No. 25, pp. 1821–1835, 2005.
[9] Fraser, S.M., Abdel Razek, A.M., Abdullah, M.Z., "Computational and experimental investigations in a cyclone dust separator", Jour, Process Mechanical Engineering, Vol. 211, pp. 247–257, 1997.
[10] Konig, C., "Studies on the deposition behavior in geometry similar cyclones", Ph.D Thesis, University of Kaiserslautern, 1990.
[11] Hinze, J.O., "Turbulence", McGraw-Hill Publishing Co., New Yourk, 1975.
[12] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, A. Z., Zhu, J., "A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation", Computers Fluids, Vol. 24, pp. 227-238, 1995.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.6.7]