

مقاله علمی-پژوهشی

مطالعه عددی حرکت گندم در داخل سیکلون جداکننده استرماند با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

ساجد نعیمی دیزجیکان^۱، غلامحسین شاهقلی^{۲*}، عادل رضوانی وند فنائی^۳، وحید رستم پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳

چکیده

سیکلون‌ها از جمله جداکننده‌های گریز از مرکز هستند که به دلیل سادگی و هزینه‌های ساخت و نگهداری نسبتاً پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار دو پارامتر کلیدی در عملکرد سیکلون‌ها می‌باشند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک ابزار قدرتمند برای پیش‌بینی رفتار جریان در طیف گسترده‌ای از طراحی و شرایط عملیاتی است که با حل عددی معادلات ناویر استوکس درک بهتری از حل عددی آشفتگی می‌دهد. در این مطالعه از یک سیکلون استرماند بازده بالا برای مطالعه رفتار گندم در داخل سیکلون استفاده گردید. برای رسم شبکه مسئله از نرم‌افزار گمبیت و برای حل معادلات بقا از نرم‌افزار کد تجاری انسیس فلونت ۱۵ بهره گرفته شد. با توجه به عدد ماخ زیر ۰/۳، جریان، حلگر بر پایه فشار و از مدل SSTk- ω برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شد. با فرض رقیق بودن جریان گندم در داخل جریان هوا (کسر حجمی زیر ۱۲٪) فاز مجزا با ردیابی تعداد زیادی از ذرات از طریق میدان جریان محاسبه گردید. با توجه به اهمیت بالای میدان‌های فشار و سرعت و تاثیر مستقیم بر روی بازده عملکردی سیکلون، در سرعت‌های ورودی $10, 12, 14, 16, 18$ و 20 m s⁻¹ و نرخ جرمی جریان 0.08 kg s⁻¹ پارامترهای فشار استاتیک، فشار کل، سرعت محوری، سرعت مماسی، شدت آشفتگی و سایش با همدیگر مقایسه شد. همچنین بازده جمع‌آوری برای سرعت‌های فوق به‌دست آمد. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی شرایط سرعت ورودی 16 m s⁻¹ بهترین عملکرد را دارا بود.

واژه‌های کلیدی: استرماند، افت فشار، دینامیک سیالات محاسباتی، سیکلون

مقدمه

دهند. پیش‌بینی دقیق افت فشار در داخل سیکلون بسیار مهم است، زیرا به‌طور مستقیم با هزینه‌های عملیاتی در ارتباط است. شکل ۱ شماتیکی از یک سیکلون معمول را به همراه بخش‌های مهم آن نشان می‌دهد.

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۵) یک ابزار متنوع برای پیش‌بینی رفتار جریان در طیف گسترده‌ای از طراحی و شرایط عملیاتی است. حل عددی معادلات ناویر استوکس اساس تمام تکنیک‌های CFD می‌باشد که نتیجه پیشرفت سریع کامپیوترها و درک بهتر از حل عددی آشفتگی است. با توسعه به این پیشرفت سریع CFD، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی عملکرد سیکلون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برای جریان آشفته در سیکلون‌ها، کلید موفقیت CFD توصیف دقیق رفتار آشفتگی جریان است.

انسیس فلونت یک برنامه تجاری استفاده‌کننده از رویکرد حجم محدود CFD است که برای انجام محاسبات کوپل^۶ یا جداگانه^۷ (به

سیکلون‌ها از جمله تجهیزات مورد استفاده در سطح وسیع هستند که برای جداسازی ذرات جامد از فاز سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به سادگی ساخت، هزینه‌های اجرا و نگهداری پایین و شرایط کاری سخت و در دماهای بالا، روز به روز علاقه‌مندی برای استفاده از سیکلون‌ها در حال افزایش است. نیروی گریز از مرکز ایجاد شده توسط جریان چرخشی در یک سیکلون باعث حرکت ذرات موجود به سمت دیواره و جدا شدن از فاز سیال می‌شود. ذرات درشت‌تر توسط نیروی گریز از مرکز قوی‌تر حرکت کرده و در خروجی پایینی در کف سیکلون جمع می‌شوند. ذرات ریزتر در جریان سیال باقی مانده و از طریق گردابه‌یاب از خروجی بالای سیکلون خارج می‌شوند. مهندسان عموماً به دو پارامتر بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار علاقه‌مند هستند تا یک ارزیابی کامل را از طراحی و عملکرد یک سیکلون انجام

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

۴- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

(Email: gshahgoli@yahoo.com)

* - نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jam.v11i2.79613

5- Computational Fluid Dynamics

6- Coupled

7- Segregated

سیکلون را تحت تاثیر قرار می‌دهد مورد مطالعه قرار گرفت (Alexander, 1949). مطالعه بر روی تاثیر قطر نوک مخروط سیکلون بر روی افت فشار و عملکرد سیکلون‌ها انجام شد و نتیجه گرفته شد زمانی که قطر نوک مخروط کاهش می‌یابد، افت فشار کل و عملکرد سیکلون افزایش می‌یابد (Gimbun et al., 2005c). هم‌چنین در مطالعه دیگری عملکرد سیکلون‌های با یک ورودی با سیکلون‌هایی با دو ورودی مقایسه شد و مشخص گردید که سیکلون با دو ورودی نسبت به سیکلون یک ورودی به دلیل افزایش بازده، عملکرد بهتری دارد (Zhao et al., 2006). در پژوهش دیگری، یک بررسی تجربی برای مطالعه اثرات طول سیکلون بر روی عملکرد سیکلون انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش طول سیکلون (تا ۵/۵ برابر قطر سیکلون)، عملکرد سیکلون به صورت چشم‌گیری افزایش یافته و تحت تاثیر این طول، بازده به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد (Hoffmann et al., 2001). یک شبیه‌سازی CFD سیکلون با تمرکز بر تاثیر ارتفاع سیکلون بر روی دامنه جریان انجام گرفت و نشان داده شد که با افزایش ارتفاع، سرعت مماسی کاهش می‌یابد. مدل‌سازی انتقال مواد در جداکننده‌های سیکلونی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در یک پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است (Rezvanivandefanayi et al., 2013a). بررسی تاثیر نرخ سیالیت جرمی، در میدان‌های سرعتی، افت فشار و اصطکاک دیواره جداکننده‌های سیکلونی با استفاده از CFD نیز در سه مطالعه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Rezvanivandefanayi et al., 2013b, c, d). هم‌چنین یک مطالعه CFD در مورد اثرات قطر ذرات خوراک بر روی افت فشار در داخل یک سیکلون جداکننده انجام شده است (Rezvanivandefanayi and Nikbakht, 2015). هم‌چنین در زمینه سایر کارهای مرتبط با کاربرد CFD در کشاورزی، مطالعه ترموکمپرسور بخار به‌منظور کاهش مصرف انرژی در خط تولید شکر به روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است (Rezvanivandefanayi et al., 2019). مطالعه دیگری در مورد مقایسه بین خروجی پیش‌بینی شده از کالکتور خورشیدی صفحه تخت و نتایج تجربی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است (Naddi et al., 2017).

در کارهای ذکر شده در بالا که بر روی شبیه‌سازی CFD جریان داخلی سیکلون انجام شده‌اند، تمرکز اصلی بر پارامترهای هندسی مختلف مانند ابعاد ورودی، زوایای ورودی، ارتفاع سیکلون، قطر بخش استوانه‌ای، قطر بخش خارجی، وضعیت‌های مختلف قرارگیری گردابه‌یاب و قطر نوک مخروط بوده است. هم‌چنین مطالعات کمی بر روی تاثیر پارامترهای جریان ورودی بر روی فعل و انفعالات اتفاق افتاده در داخل سیکلون، بحث افت فشار و هم‌چنین شدت آشفتگی و سایش داخل سیکلون انجام شده است. بنابراین هدف از این تحقیق به‌دست آوردن پارامترهای جریان ورودی مناسب به هنگام انتقال

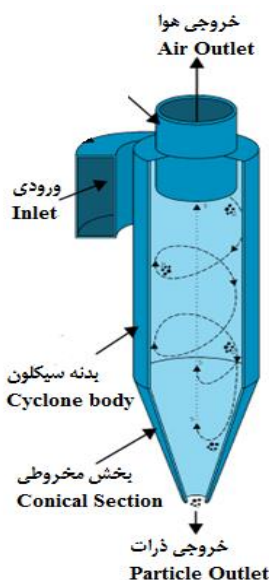
کمک معادلات بقای جرم^۱، بقای مومنتوم^۲ و بقای انرژی^۳ استفاده می‌شود. این به صورت ایده‌آل برای جریان‌های غیر متراکم و نسبتاً قابل تراکم مناسب است. بقای جرم، مومنتوم و انرژی در جریان‌های سیال در عبارت‌های معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شود که راه‌حل را با روش‌های تحلیلی ارائه می‌دهد. حل این معادلات با ظهور ایستگاه‌های کاری قدرتمند امکان‌پذیر شده و راه‌های ساده‌ای برای محاسبه میدان‌های جریان پیچیده با سهولت نسبی فراهم شده است. برای مدل‌سازی جریان چرخشی در سیکلون، چند نوع از مدل‌های آشفتگی در انسیس فلونت وجود دارد (Ansys Fluent theory guide, 2013).

مطالعات در مورد سیکلون‌ها با افزایش قابلیت کامپیوترها سرعت بیشتری به خود گرفته است. مطالعات انجام گرفته در زمینه تاثیر ابعاد سیکلون بر روی بازده جمع‌آوری، افت فشار، ویژگی‌های جریان‌های داخلی و هم‌چنین بحث‌های مربوط به سایش و خوردگی انجام گرفته است و به بحث مربوط به تاثیر ویژگی‌های ورودی بر روی نیروهای گریز از مرکز کمتر پرداخته شده است. یکی از اولین مطالعات در این حوزه شامل مطالعه‌ای با موضوع مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تجربی عملکرد یک نمونه سیکلون می‌باشد (Griffiths and Boysan, 1996). پژوهش دیگری در زمینه مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی بر روی پیش‌بینی بازده جمع‌آوری سیکلون انجام پذیرفته است (Gimbun et al., 2005a). در ادامه تاثیر دما و سرعت ورودی بر افت فشار داخل سیکلون در قالب یک مطالعه CFD مورد بررسی قرار گرفته است (Gimbun et al., 2005b). بهینه‌سازی هندسه سیکلون جداکننده برای کمینه کردن افت فشار با استفاده از مدل‌های ریاضیاتی و شبیه‌سازی‌ها مطالعه شده است (Elsayed and Lacor, 2010). هم‌چنین در مورد انتخاب مدل اغتشاشی مناسب مطالعات زیادی انجام گرفته شده و مشخص شده است که انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی پیچیده در داخل سیکلون‌ها کاملاً ضروری است. تفسیر جریان سیال در داخل سیکلون با استفاده از سه مدل آشفتگی مختلف مطالعه شده و مدل RSM به‌عنوان مدل مناسب پیشنهاد شده است (Hoekstra, 1999). در مطالعه دیگری، سه مدل آشفتگی SST، RSM و k-ε برای شبیه‌سازی جریان هوای داخل سیکلون استفاده شد و مشخص شد که مدل آشفتگی SST به‌صورت قابل‌توجهی بهتر از روش‌های RSM و k-ε می‌باشد (Ahmadi and Nowakowski, 2016). موضوع مهم دیگر در شبیه‌سازی عددی الگوهای جریان در سیکلون‌ها در نظر گرفتن اثرات هندسی است که توسط محققین مختلف انجام شده است. در یکی از مطالعات، تعدادی از پارامترهای هندسی که عملکرد

- 1- Conservation of mass
- 2- Conservation of momentum
- 3- Conservation of energy

سیکلون در سرعت‌های مختلف ورودی مواد به داخل سیکلون است.

گندم در داخل سیکلون و همچنین به دست آوردن بهترین سرعت ورودی، سایش در هر کدام از حالت‌ها و مشاهده جریان‌های داخلی



شکل ۱- شماتیکی از یک سیکلون
Fig.1. A Schematic of a Cyclone

۰/۰۷ و محدوده کاری ۰/۱۲۵ تا 50 m s^{-1} و یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار (مدل CPE310s- KIMO) با دقت ۰/۱ پاسکال انجام گرفت که به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. ابعاد سیکلون مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۴ و شماتیک کلی سیکلون در شکل ۵ آورده شده و اندازه بخش‌های مختلف سیکلون در قالب جدول ۱ ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

با توجه به انجام تست‌های اولیه تجربی و مشاهده جریان‌یابی مواد، نرخ جرمی 0.08 kg.s^{-1} به عنوان نرخ جرمی مواد جامد مورد استفاده انتخاب شد. ۶ سطح سرعت ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و 20 m s^{-1} برای درک هرچه بیشتر تاثیر سرعت ورودی بر عملکرد سیکلون به عنوان سطوح تست انتخاب شدند. اندازه‌گیری‌ها توسط یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ (مدل TSI- 8465 با رزولوشن m s^{-1}



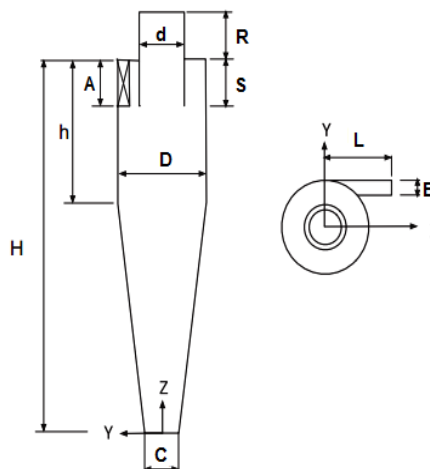
شکل ۳- اختلاف فشارسنج
Fig.3. Differential pressure meter



شکل ۲- سرعت‌سنج هوای سیم داغ
Fig.2. Hot wire anemometer



شکل ۵- سیکلون استرماند استفاده شده
Fig.5. Used stairmand cyclone



شکل ۴- سیکلون مورد استفاده در آزمایش‌ها
Fig.4. Used cyclone in experiments

جدول ۱- اندازه بخش‌های مختلف سیکلون
Table 1- Values of different parts of cyclone

| پارامترها Parameters | اندازه Value (cm) |
|---|----------------------|
| قطر بدنه اصلی (D) Body diameter | 55 |
| قطر خروجی گاز (d) Gas outlet diameter | 27.5 |
| ارتفاع ورودی (A) Inlet height | 27.5 |
| عرض ورودی (B) Inlet width | 11 |
| طول محفظه خروجی گاز (R) Gas outlet duct length | 27.5 |
| ارتفاع کل (H) Total Height | 220 |
| ارتفاع بخش استوانه‌ای (h) Cylindrical section Height | 82.5 |
| قطر لوله تخلیه (C) Outlet pipe diameter | 15.1 |
| طول بخش ورودی (L) Inlet length | 35 |

معادله بقای جرم (پیوستگی)

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومنتوم

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

p فشار استاتیک، $\rho \vec{g}$ نیروی حجمی جاذبه و $\bar{\tau}$ تانسور تنش است که از رابطه (۳) به دست می‌آید:

توصیف مدل عددی

معادلات حاکم

قوانین حاکم بر جریان هر نوع جریان و هر نوع هندسه که در CFD در نظر گرفته شود عبارتند از: قانون بقای جرم، قانون بقای مومنتوم و قانون بقای انرژی. در حالت کلی این سه قانون یک دستگاه معادلات جفت شده‌ی غیرخطی PDE هستند که تا به حال برای آن‌ها حل تحلیلی پیدا نشده است. قوانین بقا برای جریان داخلی حل گردید. معادلات بقای جرم و مومنتوم در حالت کلی به صورت زیر بیان می‌شوند (Ansys Fluent theory guide, 2013):

ناحیه به صورت حجم محدود در یک مجموعه گسسته سازی می شود، این منطقه پس از گسسته سازی شبکه یا مش نامیده می شود. در گسسته سازی با کاهش مرتبه معادلات دیفرانسیل جزئی امکان حل عددی آن معادلات فراهم می شود که پارامتر مهمی برای انتخاب یک شبکه مطلوب و نحوه تولید شبکه مورد مطالعه است.

شبکه بندی دامنه محاسباتی

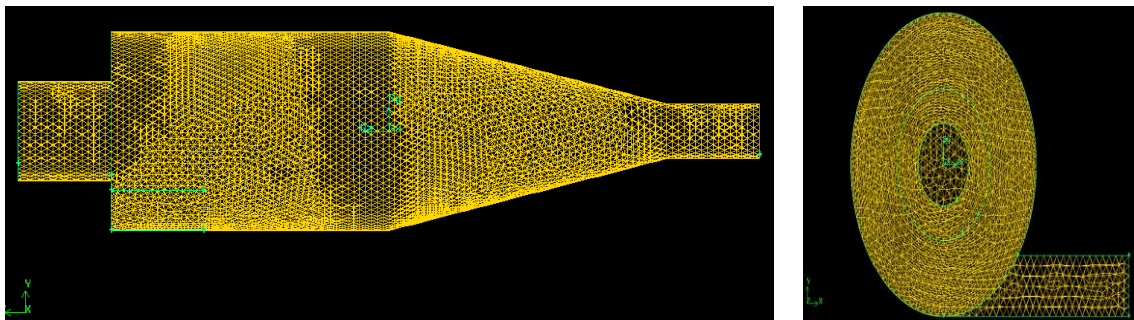
در ادامه، مش بندی سیکلون از دو دید مستقیم و بالا در شکل ۶ نشان داده شده است. برای مش بندی از نوع مش ترکیبی بهره برده شده است.

$$\bar{\tau} = \mu_{effective} \left[(\nabla \vec{v}) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

$$\mu_{effective} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

$\mu_{effective}$ ویسکوزیته مؤثر و μ_t ویسکوزیته آشفته است. به دلیل این که هیچ نوع انتقال حرارت در محاسبات وارد نشده است، لذا معادلات انرژی آورده نشده است.

گسسته سازی در CFD



شکل ۶- مش بندی سیکلون در نرم افزار گمبیت
Fig.6. Meshing of cyclone in Gambit

مدل انتقال تنش برشی (SST) یک ورژن اصلاح شده از مدل دو معادله ای $k-\omega$ است. این مدل دو مدل آشفته $k-\omega$ و $k-\epsilon$ را با هم ترکیب می کند. در بخش داخلی لایه مرزی مدل $k-\omega$ مورد استفاده قرار می گیرد و در جریان تنش آزاد به مدل $k-\epsilon$ تغییر می یابد. مدل SST از فرضیه بوسنیسک برای ارتباط تنش های رینولدز با میانگین نرخ تغییر شکل ها به صورت زیر استفاده می کند. (Ansys Fluent theory guide, 2013)

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

τ_{ij} تانسور تنش، ρ چگالی، u مؤلفه سرعت در راستای مدنظر، μ ویسکوزیته دینامیکی و S اندازه نرخ کرنش است. فرم بقای معادلات انتقال برای هر دوی انرژی جنبشی k و نوسان آشفته ω به صورت زیر نوشته می شود:

$$\rho \frac{\partial (k)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial (\omega)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j \omega)}{\partial x_j} = P_k \frac{\rho}{\mu_t} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (7)$$

σ_ω و σ_k به ترتیب عدد پرنتل آشفته گی برای k و ω هستند.

تنظیمات حلگر

نوع حلگر در نرم افزار با توجه به مقدار عدد ماخ تعیین می شود. عدد ماخ که به صورت سرعت یک جسم در یک سیال به سرعت صوت در همان سیال تعریف می گردد، تراکم پذیر بودن یا تراکم ناپذیر بودن یک جریان را مشخص می کند. اگر این مقدار کمتر یا مساوی 0.3 باشد به معنی تراکم ناپذیر بودن جریان و در صورت این که بیشتر از 0.3 باشد به مفهوم تراکم پذیر بودن جریان است. از حلگر بر مبنای فشار در محیط های تراکم ناپذیر و از حلگر بر مبنای چگالی در محیط های تراکم پذیر استفاده می شود. با توجه به سرعت مواد ورودی به سیکلون و عدد ماخ پایین جریان، می توان از حلگر بر مبنای فشار در این مطالعه استفاده کرد. با توجه به محدوده مقادیر سرعت ورودی؛ عدد ماخ در محدوده 0.29 تا 0.58 است که تراکم ناپذیر بودن جریان را نشان می دهد.

مدل سازی آشفته گی

ν ویسکوزیته سینماتیکی و d فاصله تا سطح بعد است.

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right) \quad (12)$$

$CD_{k\omega}$ به صورت بخش مثبت عبارت متقابل انتشار تعریف می‌گردد.

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (13)$$

$$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right) \quad (14)$$

$k, \sigma_k, \sigma_\omega, \sigma_{\omega 2}, \beta_1, \beta_2, \beta^*, a_1$ ضرایب انسداد هستند و مقادیر آن‌ها در مدل SST در جدول ۲ آورده شده است.

همچنین P_k تولید انرژی جنبشی آشفتگی با در نظر گرفتن میانگین گرادیان‌های سرعت است. P_k به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \left[\mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

μ_t ویسکوزیته آشفته بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (9)$$

مقدار تابع F_1 در جریان آزاد (مدل $k-\omega$) صفر و در لایه مرزی (مدل $k-\epsilon$) برابر یک است. به این صورت داریم:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (10)$$

$$\arg_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2}\right] \quad (11)$$

جدول ۲- ضرایب ثابت مدل SST

Table 2- Constant values of SST model

| k | σ_k | σ_ω | $\sigma_{\omega 2}$ | β_1 | β_2 | β^* | a_1 |
|--------|------------|-----------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 0.4187 | 0.85 | 0.5 | 0.856 | 0.0785 | 0.0828 | 0.09 | 0.31 |

شرایط مرزی

تعریف شرط مرزی از اهمیت بالایی برای حل صحیح مسئله و استخراج میدان‌های حل برخوردار است. شرایط مرزی مورد استفاده در این مطالعه، شامل شرط مرزی سرعت در ورودی و شرط مرزی فشار خروجی در دو بخش خروجی بالا و پایین است. همچنین سایر سطوح سیکلون به صورت دیواره تعریف شدند. نوع و مقدار شرایط مرزی در جدول ۳ آورده شده است. همچنین مشخصات فاز جامد در جدول ۴ ارائه شده است.

معادله انرژی جنبشی در مدل به صورت زیر تصحیح می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k f_{rot} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (15)$$

و نرخ تلفات ویژه در مدل اصلی SST به صورت زیر تصحیح می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\rho P_k}{\mu_t} f_{rot} - D_\omega + Cd_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{ef} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (16)$$

f_{rot} تابش چرخش است. f_{rot} به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f_{rot} = \max\{\min(f_{r1}, 1.25), 0.0\} \quad (17)$$

جدول ۳- شرایط مرزی

Table 3- Boundary conditions

| نوع شرط مرزی Boundary Condition type | مقدار یا حالت Value/ Condition |
|---|--------------------------------------|
| سرعت ورودی velocity inlet | 12 to 20 m.s ⁻¹ |
| فشار خروجی Pressure outlet | فشار اتمسفر Atmosphere pressure |
| دیواره Wall | شرایط بدون لغزش No slip condition |
| قطر هیدرولیکی Hydraulic diameter | 0.157 m |
| شدت آشفتگی Turbulent intensity | ٪5 |

جدول ۴- مشخصات فاز جامد
Table 4- Solid phase properties

| مشخصه Property | مقدار Value |
|--------------------------------|-------------|
| چگالی Density | 790 kg/s |
| قطر کمینه Minimum diameter | 0.2 cm |
| قطر بیشینه Maximum diameter | 0.8 cm |
| قطر متوسط Mean diameter | 0.5 cm |

است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p |u_g - u_p|}{\mu} \quad (20)$$

در انسیس فلونت، ضریب درگ برای ذرات کروی با استفاده از همبستگی‌های اصلاح شده محاسبه می شود. معادله حرکت برای ذرات در امتداد مسیر یک ذره منفرد انتگرال گیری می شود. بازده جمع آوری با رهاسازی تعداد مشخصی از ذرات مجزا از ورودی سیکلون و نظارت بر تعداد خارج شده از طریق خروجی پایینی به دست می آید. برخوردی بین ذرات و دیواره‌های سیکلون به صورت الاستیک کامل فرض می شود.

آزمون استقلال از شبکه

در شبیه سازی سیکلون از چهار سطح اندازه مش برای اطمینان از استقلال شبکه استفاده شد. تعداد سلول‌های مش در چهار سطح بیان شده تقریباً ۴۲۵۷۰۰، ۶۱۲۶۰۰، ۸۱۲۴۱۰ و ۱۱۴۶۱۰۰ عدد مش بودند. نتایج شبیه سازی نشان داد که تفاوت بین افت فشار بین ورودی گاز و خروجی گرداب یاب در دو سطح مش ۶۱۲۶۰۰ عدد و ۸۱۲۴۱۰ عدد مش کمتر از ۲/۵٪ بود و بعد از آن افزایش تعداد مش تأثیری بر نتایج نداشت. بنابراین، برای صرفه جویی‌های زمانی در حل، ۶۱۲۶۰۰ عدد مش به عنوان مش پایه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

در بخش مربوط به نتایج در ابتدا به اعتبارسنجی نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه سازی پرداخته می شود. سپس در ادامه پارامترهای مربوط به بازده جمع آوری و افت فشار بحث می گردند و در نهایت سرعت مماسی و محوری به عنوان پارامترهای حائز اهمیت در سیکلون مورد مطالعه قرار می گیرند.

اعتبارسنجی

شبیه سازی‌های CFD برای قابل اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شوند. برای این منظور از داده‌های مربوط به افت فشار در سرعت‌های ورودی مختلف استفاده گردید. مقادیر افت فشار در

مدل فاز گسسته^۱ (DPM)

در دیدگاه لاگرانژی ذره ردیابی می شود و در دیدگاه اویلری از حجم کنترل برای بررسی رفتار جریان استفاده می گردد. مدل فاز گسسته در انسیس فلونت از رویکرد اویلر- لاگرانژی تبعیت می کند. فاز سیال با حل معادلات میانگین گیری شده زمانی به صورت پیوسته حل می شود، در حالی که فاز پراکنده با ردیابی تعداد زیادی از ذرات از طریق میدان جریان محاسبه می گردد. فاز پراکنده می تواند مومنتوم، جرم و انرژی را با فاز سیال مبادله کند.

فرض اساسی این رویکرد این است که فاز پراکنده (دوم) دارای یک کسر حجمی پایین (معمولاً کمتر از ۱۲ درصد حجمی، که درصد حجمی نسبت بین حجم کل ذرات و حجم ناحیه سیال است) باشد، حتی اگر بارگذاری جرمی بالایی مورد استفاده قرار گیرد. مسیره‌های ذرات به صورت جداگانه در فواصل مشخص شده در محاسبه فاز سیال محاسبه می شوند. این باعث می شود که مدل برای مدل سازی جریان‌های ذره‌ای مناسب باشد. برای مدل سازی سیکلون‌های با بارگذاری شدید، تعاملات ذره با ذره و آشفتگی ذرات باید در نظر گرفته شود.

از نظر رویکرد اویلر- لاگرانژی، معادله حرکت ذره توسط رابطه (۱۸) بیان می شود (Ansys Fluent theory guide, 2013):

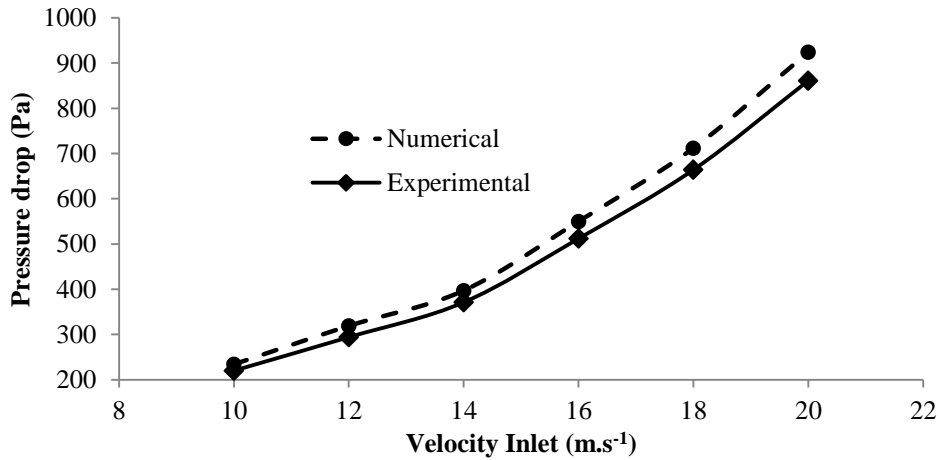
$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} C_d \frac{Re_p}{24} (u_i - u_{pi}) + \frac{g_i (\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (18)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (19)$$

عبارت $F_k = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} C_d \frac{Re_p}{24}$ نیروی درگ بر واحد جرم ذره است.

ρ_p و μ به ترتیب چگالی گاز و ویسکوزیته دینامیکی هستند، C_d ضریب درگ، u_{pi} و u_i به ترتیب سرعت گاز و ذره در راستای i هستند. g_i شتاب جاذبه در راستای i و Re_p عدد رینولدز نسبی

سرعت‌های ورودی مختلف از تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورددار بود (شکل ۷).



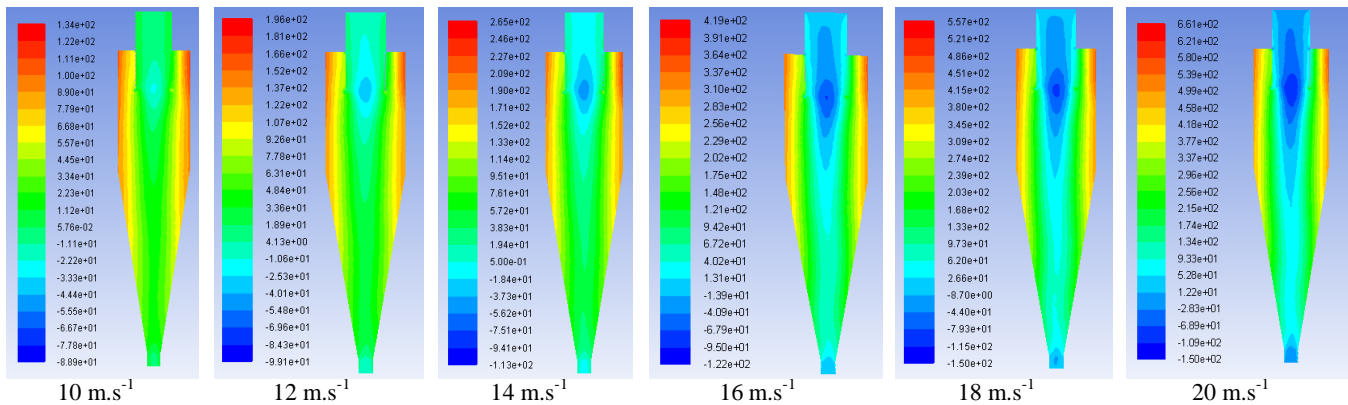
شکل ۷- اعتبارسنجی
Fig.7. Validation

فشار کل

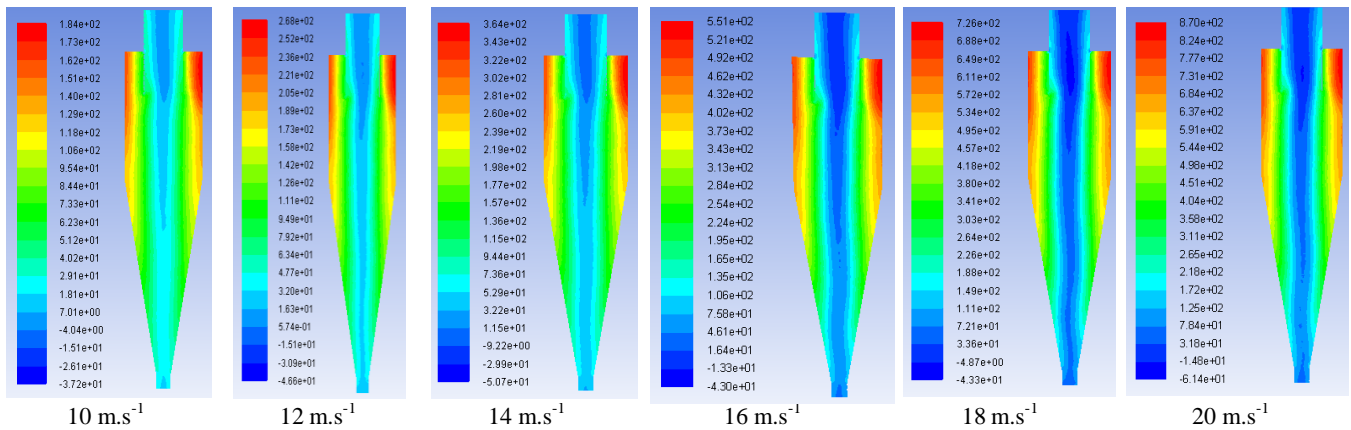
در کنار فشار استاتیک، فشار کل نیز به علت ماهیت خود در ارائه فشار دینامیکی طبق رابطه برنولی حائز اهمیت است. با مراجعه به شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که روند فشار دینامیکی مشابه روند افزایشی فشار استاتیک به‌ازای افزایش سرعت ورودی است. با توجه به مصالحه بین بازده جمع‌آوری و افت فشار باید سرعت‌هایی را در نظر گرفت که افت فشار کمتری را به سیستم تحمیل کنند. با توجه به مسائل بیان‌شده، در این مورد نیز می‌توان سرعت‌های ورودی 16 m s^{-1} و 18 m s^{-1} را به‌عنوان سرعت‌های ورودی حائز شرایط برای استفاده بهتر در سیکلون در نظر گرفت. در نزدیکی‌های دیواره به سبب کاهش سرعت، فشار کل دارای بیشترین مقدار خود است که ناشی از افزایش فشار استاتیک و بالا رفتن عبارت مربوطه به فشار استاتیک در رابطه فشار کل در این مناطق است.

فشار استاتیکی

یکی از مهم‌ترین موارد در بررسی سیکلون‌ها مبحث فشار استاتیک است چرا که پدیده جداسازی اتفاق افتاده در سیکلون را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان‌طوری که در شکل ۸ قابل مشاهده است، با افزایش سرعت ورودی، فشار استاتیکی در داخل مجموعه افزایش می‌یابد. برای جداسازی مؤثر در داخل سیکلون بایستی در خط واصل بین خروجی بالایی و پایینی جریان مکش برقرار گردد. با توجه به کانتورهای ارائه‌شده در سرعت‌های مختلف می‌توان کیفیت ایجاد شده فشار منفی را با جزئیات مشاهده کرد. با توجه به مطالب ارائه شده در شکل ۸، می‌توان دریافت که سرعت‌های 16 m s^{-1} و 18 m s^{-1} از پتانسیل خوبی برای استفاده به‌عنوان سرعت پایه سیال ورودی به سیکلون برخورددار است. سرعت 20 m s^{-1} به دلیل ایجاد افت فشار بالا به سبب داشتن فشار استاتیکی بالا، برای جداسازی مناسب نیست.



شکل ۸- کانتور فشار استاتیکی در سرعت‌های مختلف
Fig.8. Static pressure contours in various inlet velocities



شکل ۹- کانتور فشار کل در سرعت‌های مختلف
Fig.9. Total pressure contours in various inlet velocities

سرعت‌های محوری و مماسی

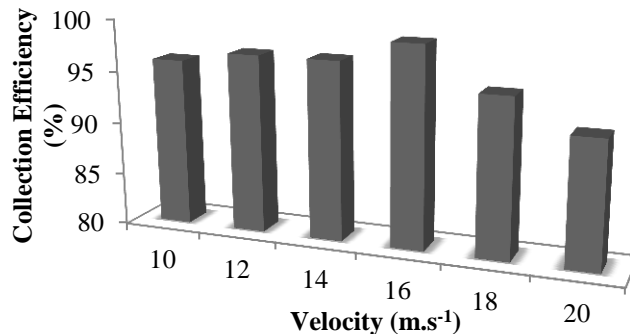
همان‌طوری که از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است. روند افزایشی در مورد سرعت‌های محوری و مماسی نیز اتفاق افتاده است. در زمینه سرعت محوری، حرکت جریان شامل هوای حامل و دانه‌های گندم در سه حوزه قابل تفسیر است. منطقه (۱) شامل بخش گردابه‌یاب سیکلون و کمی از بخش پایینی آن است که به سبب بالا بودن سرعت خروجی سیال و قرارگیری مواد در جهت محور سیکلون این سرعت دارای مقدار بالایی است. در بخش میانی سیکلون (منطقه ۲) چون حرکت آرام‌تر می‌گردد، تا نزدیکی بخش خروجی پایین سرعت محوری دارای مقدار پایینی است. در ادامه و با توجه به قرارگیری جریان در جهت محوری، مقدار سرعت محوری دوباره افزایش می‌یابد و وارد منطقه (۳) یعنی خروجی پایین سیکلون می‌گردد. منتهی به خاطر این که در خلاف جهت مثبت قراردادی (رو به بالا) است، مقدار منفی به خود گرفته است (مناطق (۱)، (۲) و (۳) در شکل ۱۳ نشان داده شده است).

بازده جمع‌آوری

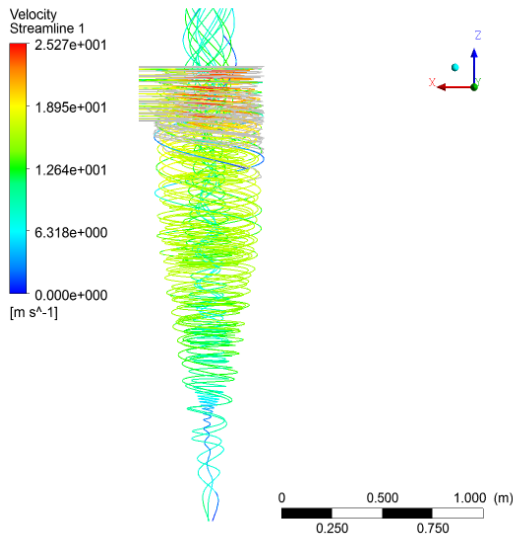
بازده جمع‌آوری در سیکلون در همه سطوح دارای مقدار ۹۲ تا ۹۹ درصد بود، بیشترین بازده جمع‌آوری برای سرعت 16 m s^{-1} (۹۹ درصد) و کمترین بازده جمع‌آوری برای سرعت 20 m s^{-1} (۹۲ درصد) حاصل شد (شکل ۱۰). در این زمینه نیز سرعت‌های 14 m s^{-1} ، 16 m s^{-1} و 12 m s^{-1} به ترتیب با بازده‌های جمع‌آوری، ۹۹، ۹۷ و ۹۷ درصد برای استفاده به صورت عملی نسبت به سایر سرعت‌های ورودی مناسب‌تر بودند.

کانتور مسیر حرکت ذرات و خط جریان

برای مشاهده مسر حرکت ذرات، کانتور مسیر حرکت ذرات در شکل ۱۱ و خط جریان سرعت در شکل ۱۲ ارائه شده است. ذرات بعد از داخل شدن به محفظه سیکلون از طریق بخش ورودی، در قسمت استوانه‌ای شکل حرکت کرده و سپس با توجه به نیروی گریز از مرکز ایجاد شده از دو بخش خروجی بالا یا خروجی پایین از سیکلون خارج می‌شوند.

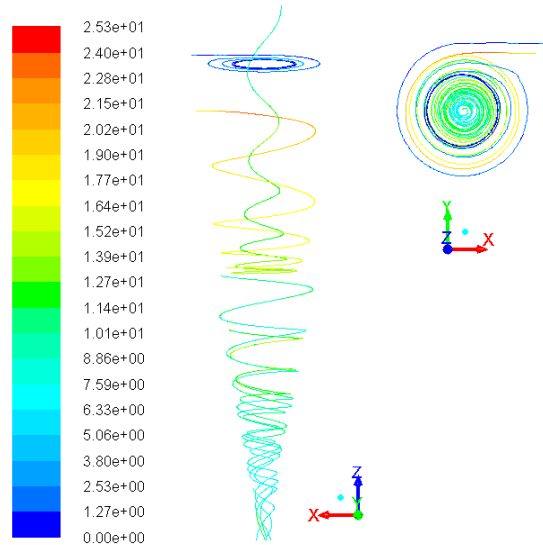


شکل ۱۰- مقایسه بازده جمع‌آوری در سرعت‌های مختلف
Fig.10. A comparison of collection efficiency in various inlet velocities



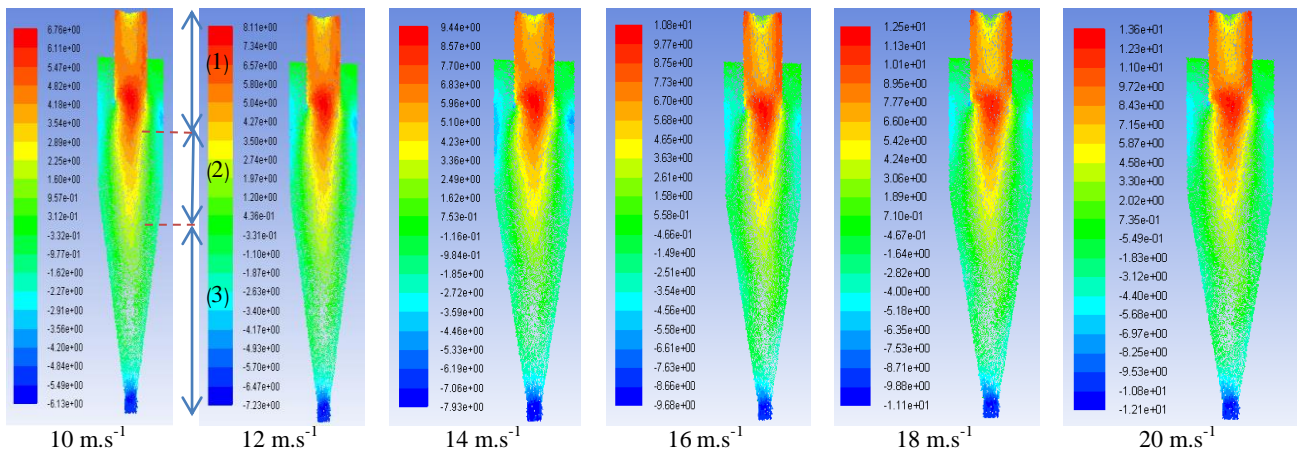
شکل ۱۲ - خط جریان سرعت
Fig. 12. Velocity streamline

مرکزی واسط بین خروجی‌ها که دارای کمترین مقدار است قابل‌ملاحظه است. در سرعت‌های بالاتر از 14 m s^{-1} حوزه جریانی (۲) دارای محدوده عملکردی بیشتری است که با رنگ نارنجی در کانتور و شاخص مورد نظر قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ - کانتور مسیر حرکت ذرات
Fig. 11. Contours of particles pathline

در مورد سرعت مماسی، به سبب نوع ورودی جریان که به صورت مماسی است، همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، بیشترین مقدار سرعت مماسی در بخش ورودی اتفاق می‌افتد، در مورد سرعت مماسی هم سه حوزه شامل (۱) ورودی با بیشترین مقدار سرعت مماسی، (۲) نزدیک دیواره‌ها با مقادیر متوسط و (۳) خط



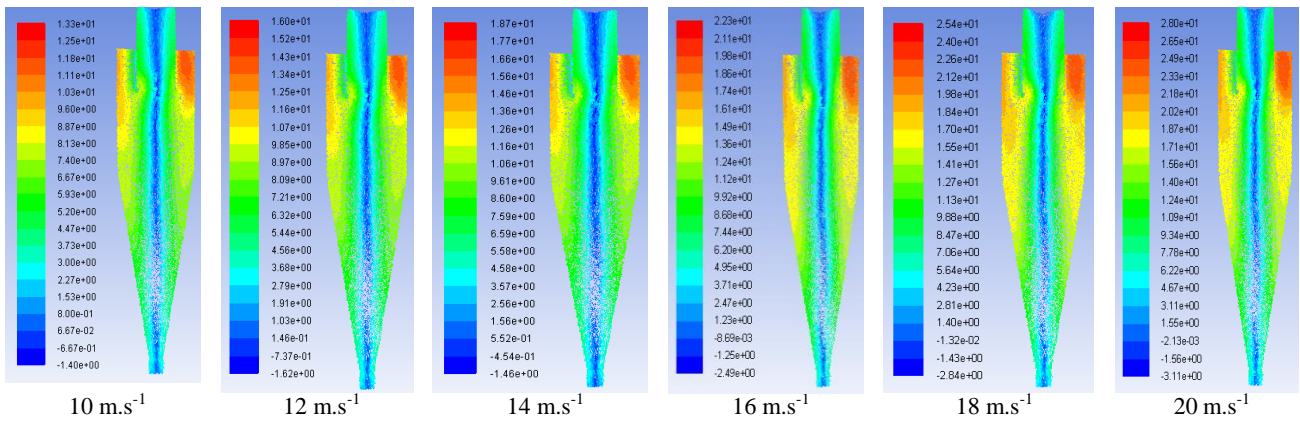
شکل ۱۳ - بردارهای جهت‌دار سرعت محوری در سرعت‌های مختلف
Fig. 13. Axial velocity vector in various inlet velocities

بخش‌های مشخص شده، بیشترین مقدار سرعت محوری در نسبت $0.6/4$ ارتفاع بخش استوانه‌ای نسبت به ارتفاع کل بخش استوانه‌ای اتفاق می‌افتد.

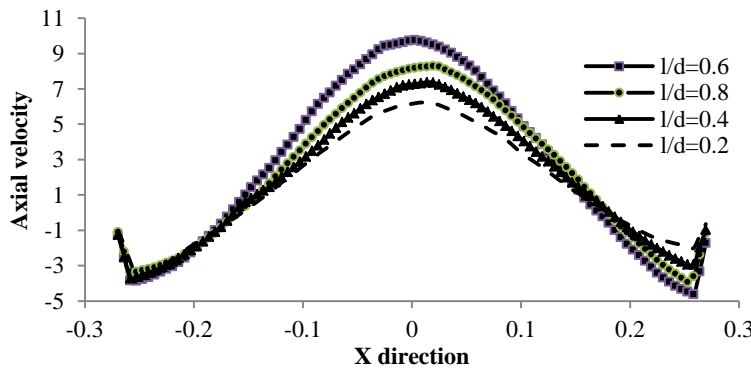
همچنین نمودار تغییرات سرعت مماسی در ۴ ارتفاع مختلف در داخل سیکلون بر اساس نسبت (l/d) در شکل ۱۶ آورده شده است.

نمودار تغییرات سرعت محوری و مماسی در ارتفاع‌های مختلف سیکلون

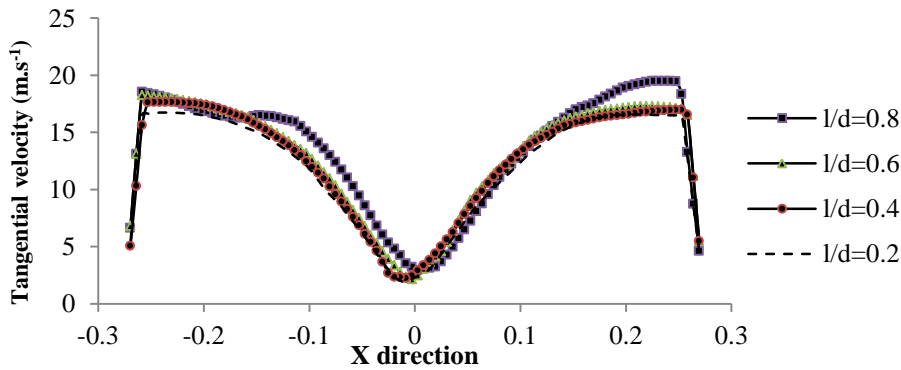
در ادامه نمودار تغییرات سرعت محوری در ۴ ارتفاع مختلف در داخل سیکلون بر اساس نسبت (l/d) آورده شده است. با توجه به روند تقریباً یکسان در سرعت‌های مختلف، این نمودارها برای سرعت ورودی ۱۸ متر بر ثانیه برای ۴ ارتفاع ارائه شده است. از بین



شکل ۱۴- بردارهای جهت‌دار سرعت مماسی در سرعت‌های مختلف
 Fig.14. Tangential velocity vector in various inlet velocities



شکل ۱۵- نمودار تغییرات سرعت محوری در ارتفاع‌های مختلف سیکلون
 Fig.15. Axial velocity variation in various cyclone heights



شکل ۱۶- نمودار تغییرات سرعت مماسی در ارتفاع‌های مختلف سیکلون
 Fig.16. Tangential velocity variation in various cyclone heights

نوسانات سرعت به سرعت میانگین است، می‌تواند به‌عنوان معیاری برای شناسایی آشفتگی‌های داخل سیکلون استفاده شود. آشفتگی‌ها با گذر از حد مشخص می‌توانند به سیستم ارتعاش وارد کرده و سبب اختلال در کار سیکلون‌ها شوند. با توجه به شکل ۱۷، کم‌ترین شدت آشفتگی مربوط به سرعت 10 m s^{-1} است، سپس با افزایش سرعت تا 14 m s^{-1} کمی افزایش می‌یابد و دامنه بیشینه آن مقداری گسترده می‌شود. با ورود به سرعت‌های 16 m s^{-1} و بالاتر از آن علاوه بر

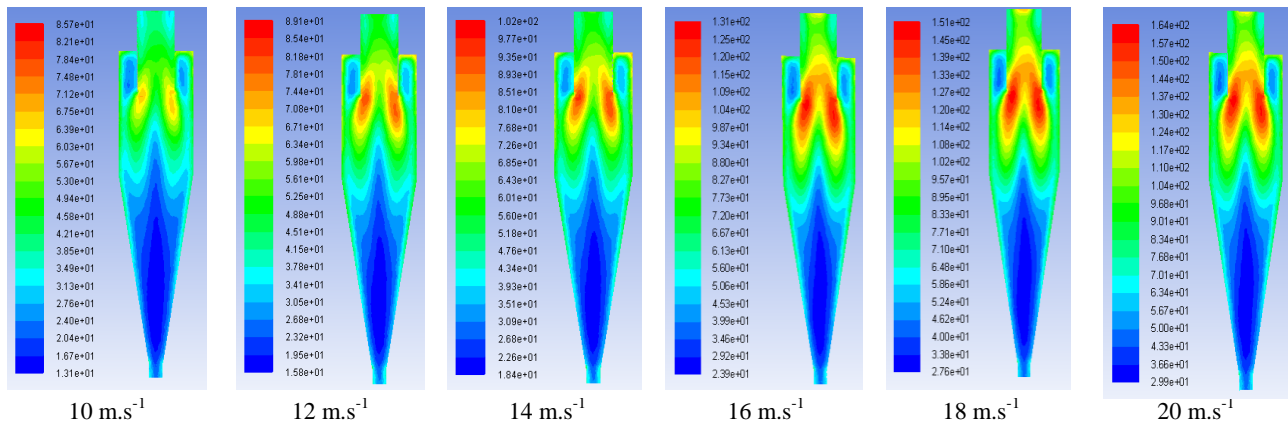
شدت آشفتگی

به‌دلیل این‌که هوا بودن سیال حامل در سیکلون‌ها در مقایسه با هیدروسیکلون‌ها که در آن‌ها از آب به‌عنوان سیال حامل استفاده می‌شود، بحث مربوط به آشفتگی اهمیت بیشتری می‌یابد. جریان‌های آشفته در سیستم ناپایداری ایجاد می‌کنند و در صورتی که این آشفتگی دارای مقدار بالایی باشد سیستم از حالت کارکرد طبیعی خود خارج خواهد شد. با توجه به تعریف شدت آشفتگی که نسبت انحراف معیار

از آلیاژهای مقاوم در برابر سایش و خوردگی، هزینه تعویض و نگهداری و تعمیرات سیکلون‌ها را به شدت کاهش داد و از وقفه ایجاد شده در محل کار به‌واسطه خرابی تجهیزات جلوگیری کرد. در مورد سایش اتفاق افتاده در دیواره سیکلون مورد مطالعه به سبب ورود مماسی مواد و برخورد مستقیم مواد با دیواره در محل ورودی بیشترین خوردگی در بخش ورودی و صفحه بالایی بخش استوانه‌ای اتفاق می‌افتد (شکل ۱۸). سپس در ادامه به دنبال جهت‌گیری مواد به سمت مرکز در زیر گردابه‌یاب و کاهش برخورد جریان با دیواره‌ها از مقدار آن کاسته خواهد شد. شکل ۱۸ روند افزایشی مقدار سایش را با توجه به افزایش سرعت ورودی نشان می‌دهد. با گذر از سرعت 10 m s^{-1} به 12 m s^{-1} سایش به‌صورت نسبتاً محسوسی تا سرعت 16 m s^{-1} افزایش می‌یابد. سپس با افزایش سرعت به 16 m s^{-1} محدوده سایشی در ورودی افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که از نقطه‌نظر سایش سرعت 10 تا 16 m s^{-1} (خود سرعت 16 m s^{-1} با توجه به مقدار پایین‌تر علی‌رغم دامنه سایشی بالاتر) می‌تواند در کاربرد عملی مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده از سرعت‌های 18 m s^{-1} و 20 m s^{-1} مستلزم مقاوم‌سازی بخش‌های مربوطه خواهد بود.

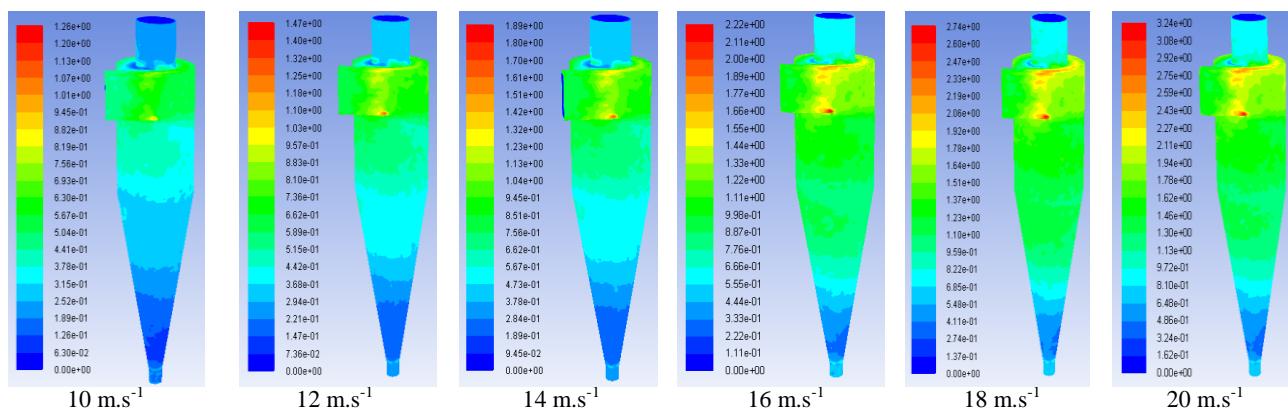
افزایش مقدار دامنه شدت آشفتگی نیز افزایش می‌یابد و در سرعت 20 m s^{-1} به بالاترین مقدار عددی خود می‌رسد. از شکل ۱۷ کاملاً مشخص است که نوسانات سرعت در گردابه‌یاب به سبب تغییرات سرعت در این منطقه مقدار بسیار بالایی دارد و در بخش مخروطی سیکلون نوسانات سرعت پایین قابل مشاهده است. همچنین در ورودی سیکلون به‌دلیل این که سرعت به‌صورت نسبتاً یکنواختی وارد می‌شود و هنوز تغییرات اتفاق نیفتاده مقدار شدت آشفتگی دارای مقدار پایین است. با در نظر گرفتن شرایط کاری، سرعت‌های 10 m s^{-1} تا 16 m s^{-1} از نقطه نظر شدت آشفتگی سرعت‌های ورودی مناسبی می‌باشند.

همیشه در مواردی که تماس دو جریان حادث گردد، سایش به سبب وجود اصطکاک امری غیرقابل‌اجتناب خواهد بود. یکی از مشکلات رایج در صنایع استفاده‌کننده از سیکلون مانند صنایع آرد، سیمان و پتروشیمی سایش و خوردگی ایجاد شده در مقاطع سیکلون می‌باشد. با شناسایی محل‌های ایجاد سایش می‌توان با اتخاذ تکنیک‌های لازم از قبیل مقاوم ساختن بخش‌های مربوطه از استفاده



شکل ۱۷- کانتور شدت آشفتگی در سرعت‌های مختلف

Fig.17. Turbulence intensity contour in various velocities



شکل ۱۸- کانتور سایش در سرعت‌های مختلف

Fig.18. Erosion contour in various velocities

نتیجه گیری

(۲): بیشترین بازده جمع‌آوری برای سرعت 16 m s^{-1} (۹۹ درصد) و کمترین بازده جمع‌آوری برای سرعت 20 m s^{-1} (۹۲ درصد) حاصل شد.

(۳): سرعت‌های محوری و مماسی هر کدام در سه حوزه بررسی شدند که برای سرعت محوری منطقه (۱) شامل بخش گردابه‌یاب سیکلون بود که به سبب بالا بودن سرعت خروجی سیال و قرارگیری مواد در جهت محور سیکلون این سرعت دارای مقدار بالایی است. بخش میانی سیکلون منطقه (۲) بود و خروجی پایین سیکلون، منطقه (۳) را شامل می‌شد. برای سرعت مماسی نیز تحلیل مشابهی ارائه گردید.

(۴): شدت آشفستگی به‌عنوان معیاری برای شناسایی آشفستگی‌های داخل سیکلون در تمامی سطوح سرعت استخراج گردید و نتیجه گرفته شد که سرعت‌های 10 m s^{-1} تا 16 m s^{-1} سرعت‌های ورودی مناسبی از نقطه نظر شدت آشفستگی می‌باشند.

(۵): نتیجه گرفته شد که از نقطه‌نظر، سایش سرعت 10 m s^{-1} تا 16 m s^{-1} قابلیت استفاده در کاربرد گسترده را دارد و سرعت‌های 16 m s^{-1} و 18 m s^{-1} نیازمند مقاوم‌سازی بخش‌های مربوطه برای جلوگیری از سایش می‌باشند.

شش سطح سرعت $10, 12, 14, 16, 18$ و 20 m s^{-1} برای درک هرچه بیشتر تأثیر سرعت ورودی بر عملکرد سیکلون به‌عنوان سطوح تست انتخاب شدند. تست‌های تجربی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی توسط یک سرعت‌سنج هوای سیم داغ (مدل TSI-8465) با رزولوشن 0.07 m s^{-1} و محدوده کاری 0.125 تا 50 m s^{-1} و همچنین یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار (مدل CPE310s-KIMO) با دقت 0.1 پاسکال انجام گرفت. سپس با تبیین معادلات حاکم، تنظیمات حلگر (بر پایه فشار)، گسسته‌سازی و انتخاب مدل آشفستگی مناسب و با بهره‌گیری از مدل فاز مجزا با تعریف شرایط مرزی مناسب مدل آشفستگی حل گردید. مقادیر فشار استاتیکی و کل، بازده جمع‌آوری، سرعت‌های محوری و مماسی و در انتها شدت آشفستگی و سایش به‌عنوان پارامترهای مهم در عملکرد سیکلون‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌صورت زیر ارائه می‌گردد: (۱): از نقطه نظر فشار سرعت‌های 16 m s^{-1} و 18 m s^{-1} از پتانسیل خوبی برای استفاده به‌عنوان سرعت پایه ورودی به سیکلون برخوردار است. سرعت 20 m s^{-1} به‌دلیل ایجاد افت فشار بالا به سبب داشتن فشار استاتیکی بالا، برای جداسازی مناسب نیست.

References

- Hoffmann, A. C., M. De Groot, W. Peng, H. W. A. Dries, and J. Kater. 2001. Advantages and risks in increasing cyclone separator length, *American Institute of Chemical Engineers Journal* 47: 2452-2460.
- Alahmadi, Y. H., A. F. Nowakowski. 2016. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator, *Chemical Engineering Science* 147: 150-165.
- Alexander, R. M. 1949. Fundamentals of cyclone design and operation, *Australasian Institute of Mining and Metallurgy* 152: 152-153.
- Elsayed, K., and C. Lacor. 2010. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. *Chemical Engineering Science* 65: 6048-6058.
- Gimbun, J., T. G. Chuah, A. Fakhru'l-Razi, and T. S. Y. Choong. 2005b. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study. *Chemical Engineering and Processing* 44: 7-12.
- Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru'l-Razi. 2005a. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics* 6: 161-168.
- Gimbun, J., T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, and A. Fakhru'l-Razi. 2005c. Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance, *Journal of Aerosol Science* 1056-1065.
- Griffiths, W. D., and F. Boysan. 1996. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science* 27: 281-304.
- Hoekstra, A. J., J. J. Derksen, and H. E. A. Van Den Akker. 1999. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, *Chemical Engineering Science* 54: 2055-2065.
- Inc. ANSYS. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 182 15317: 373-464.
- Naddi, F., S. A. Mehdi-zadeh, U. N. Zonuz. 2017. Comparing between predicted output temperature of flat-plate solar collector and experimental results: computational fluid dynamics and artificial neural network: *Journal of Agricultural Machinery* 7 (1): 298-311. (In Farsi).
- Rezvanvandefanayi, A., and A. M. Nikbakht. 2015. A CFD Study of the Effects of Feed Diameter on the Pressure Drop in Acyclone Separator: *International Journal of Food Engineering* 11: 71-77.
- Rezvanvandefanayi, A., A. Hasanpour, and A. M. Nikbakht. 2019. Study of the vapor thermos-compressor to reduce energy consumption in the sugar production line using Computational Fluid Dynamics: *Journal of Agricultural Machinery* 10 (2). (In Farsi).
- Rezvanvandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013a. Modeling of material conveying in cyclone separators using Computational fluid Dynamics: The 6th Agricultural Research Findings Conference. University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

15. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013b. Investigating the effect of mass flow rate on velocity fields of cyclone separators using computational fluid dynamics: The second national congress of organic and conventional agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
16. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013c. Investigating the effect of mass flow rate on the friction of the wall of cyclone separators using computational fluid dynamics: The second national congress of organic and conventional agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
17. Rezvanivandefanayi, A., A. M. Nikbakht, and A. Modarres Motlagh. 2013d. Investigating the effect of mass flow rate on Pressure drop of cyclone separators using computational fluid dynamics: The second national congress of organic and conventional agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
18. Zhao, B., Y. Su, and J. Zhang. 2006. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design* 84: 1158-1165.

Numerical Study of Wheat Conveying in Separator Cyclone using Computational Fluid Dynamics

S. Naiemi Dizajyekan¹, Gh. Shahgholi^{2*}, A. Rezvanivand fanaei³, V. Rostampour⁴

Received: 09-03-2019

Accepted: 14-07-2019

Introduction

Cyclones are widely used to separate solid particles from the fluid phase. Due to the ease of construction, low running costs, and hard-working conditions at high temperatures, people's interest in using cyclones is increasing day by day. Engineers are generally interested in two parameters to perform a complete evaluation of the design and operation of a cyclone. These parameters are the particle collecting efficiency and the pressure drop inside the cyclone. The precise prediction of the pressure drop in cyclone is very important which it is directly related to operating costs.

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a diversified tool for predicting flow behavior in a wide range of design and operational conditions. Numerical solution of Navier-Stokes equations is the basis of all CFD techniques, which is the result of fast computer upgrades and a better understanding of the numerical resolution of turbulence.

Materials and Methods

Regarding preliminary experimental tests and understanding the fluid flow, the flow rate of 0.08 kg s^{-1} was selected as the flow rate. Six levels of inlet velocities 10, 12, 14, 16, 18, and 20 m s^{-1} were selected for understanding the effect of inlet velocity on the cyclone performance. The measurements were carried out using a hot-air anemometer (TSI-8484 model with a resolution of 0.07 m s^{-1} and an operating range of 0.125 to 50 m s^{-1}), and a pressure differential meter instrument (CPE310s-KIMO model) with an accuracy of 0.1 Pa.

The region is discretized as a finite volume in a set, called the region grid or mesh after discretization. For incompressible fluids, pressure-based and density-based solvers are used, respectively. Regarding the velocity of the material entering the cyclone and low Mach number, a pressure-based solver could be used in this study.

The shear stress transport model (SST) is a modified version of the $k-\omega$ 2-equation model. This model combines the two turbulence $k-\omega$ and $k-\epsilon$ models. The Lagrangian discrete phase model in Ansys Fluent follows to the Euler-Lagrangian model.

Defining the best type of boundary condition is important for solving the problem and extracting solving fields. The boundary conditions used in this study include the inlet velocity in the entrance of cyclone and output pressure in both the upper and lower output sections.

Results and Discussion

In the results section, the results are initially validated by experimental results. Then, the parameters relating to separation efficiency and pressure drop are discussed. Finally, the tangential and axial velocities are considered as important parameters in the cyclone performance.

One of the important issues in the cyclones is the static pressure because it completely affects the phenomenon of separation in the cyclone. The velocities of 16 m s^{-1} and 18 m s^{-1} have a good potential for use as the base velocity of the inlet fluid to the cyclone. The velocity of 20 m s^{-1} is not suitable for separation due to high-pressure drop related to high static pressure.

The separation efficiency in the cyclone was 92 to 99% at all levels, the highest separation efficiency of 99% occurred at the velocity of 16 m s^{-1} and the lowest separation efficiency of 9% happened at the velocity of 20 m s^{-1} .

An increasing trend in axial and radial velocities occurred and the highest tangential velocity occurring in the input section. Considering the working conditions, the inlet velocities of 10 m s^{-1} to 16 m s^{-1} are appropriate for the turbulence intensity viewpoint.

Conclusions

(1): The speeds 16 m s^{-1} and 18 m s^{-1} showed a good potential for use as a base velocity of the fluid to the cyclone.

1- PhD. student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

4- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: gshahgoli@yahoo.com)

(2): The highest separation efficiency for the velocity of 16 m s^{-1} (99%) and lower isolation efficiency was obtained at velocity of 20 m s^{-1} (92%).

(3): The velocities of 10 m s^{-1} to 16 m s^{-1} are suitable input rates from the point of view of turbulence intensity.

(4): It is concluded that from the point of view of wear to the velocity of 10 to 16 m s^{-1} , practical use is possible, and the velocity of 18 m s^{-1} and 20 m s^{-1} require the reinforcement of the relevant sections.

Keywords: Computational fluid dynamics, Cyclone, Pressure drop, Stairmand