

## بررسی عددی تأثیر دبی جرمی گندم ورودی بر روی عملکرد سیکلون

ساجد نعیمی دیزجیکان<sup>۱</sup>، غلام حسین شاهقلی<sup>۲\*</sup>، عادل رضوانی وند فنائی<sup>۳</sup>، وحید رستم پور<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی (sajed491@gmail.com)
۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی (gshahgoli@yahoo.com)
۳. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه (a.rezvanivand@urmia.ac.ir)
۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه (v.rostampour@urmia.ac.ir)

### چکیده

سیکلون‌ها با توجه به سادگی ساختار، هزینه پایین ساخت و نگهداری و تعمیرات، کاربری آسان و انعطاف پذیری کاربردهای متنوعی در صنعت و کشاورزی پیدا کرده‌اند. دبی جرمی جریان ورودی به سیکلون از جمله موارد مهمی است که عملکرد یک سیکلون (افت فشار و بازده جداسازی) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل  $k-\epsilon$  SST برای شبیه‌سازی جریان آشفتگی در داخل سیکلون بهره برده شد. به ازای سه سطح از دبی جرمی شامل 0/01، 0/05 و 0/1  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  و سرعت ورودی 16 متر بر ثانیه، نتایج مربوط به افت فشار، سرعت‌های محوری و مماسی و همچنین بازده جداسازی استخراج گردید. همچنین نرخ کرنش در هر سه سطح از جریان جرمی ورودی مورد مطالعه قرار گرفت. بازده جداسازی با افزایش جریان جرمی ورودی کاهش یافت و از 99 درصد برای جریان جرمی 0/01  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  به 95 درصد برای جریان جرمی 0/1  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  رسید.

**کلمات کلیدی:** آنسیس فلونت؛ بازده جداسازی؛ دبی جرمی؛ سیکلون؛ مش بندی

\*نویسنده مسئول: gshahgoli@yahoo.com

## بررسی تأثیر دبی گندم ورودی به سیکلون به روش دینامیک سیالات محاسباتی

## مقدمه

سیکلون‌ها یکی از مؤثرترین و کارآمدترین انواع جداکننده‌ها می‌باشند. توانمندی آن‌ها به خاطر بی‌نیاز بودن به اجزای متحرک و توانایی کار در شرایط محیطی سخت هست. علاوه بر این سیکلون‌ها برای عملیات با فشار و دمای بالا مناسب می‌باشند. در یک سیکلون، جریان گاز با ورود مماسی خود باعث ایجاد حرکت چرخشی می‌شود و نیروی گریز از مرکز به وسیله جریان چرخشی ذرات در مسیر دیواره سیکلون ایجاد می‌شود. بعد از برخورد ذرات به داخل یک بخش مخروط شکل واقع در قسمت پایینی سقوط می‌کنند. سیکلون‌ها هم‌چنین برای کلاس‌بندی ذرات بر اساس ویژگی‌های آن‌ها مانند وزن، چگالی، اندازه و شکل مورد استفاده قرار می‌گیرند. به علت قابلیت اطمینان بالای سیکلون‌ها به صورت مؤثر برای جداسازی دو فاز مخلوط گاز و مایع استفاده می‌شوند [1]

اساس کار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) تبدیل معادلات حاکم بر سیالات به روابط جبری است. دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند در حل معادلات مربوط به میدان‌های فشار، سرعت و دما در زمینه‌های کشاورزی، مکانیک، فیزیک، شیمی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. این روش می‌تواند برای مدل‌سازی جریان سیال، انتقال جرم، انتقال حرارت و مونتوم و طراحی در بخش کشاورزی استفاده شود [2].

اسلک و همکاران (2000) در زمینه پیشرفت‌ها در مدل‌سازی سیکلون با استفاده از شبکه‌های بدون ساختار مطالعه‌ای را انجام دادند. مطالعه آن‌ها شامل بررسی کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی برای سه مش سه‌بعدی بدون ساختار با استفاده از مدل‌های آشفته RSM و LES بود. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های بادسنجی لیزر داپلر نشان داد که تطابق خوبی بین مشخصه‌های محوری در راستای طول یک سیکلون استرماند با راندمان بالا وجود دارد [3].

گیمبون و همکاران (2005) تأثیر دما و سرعت ورودی روی افت فشار سیکلون را مطالعه کردند و اعلام کردند که افت فشار سیکلون می‌تواند به‌عنوان تابعی از سرعت ورودی اولیه بازنویسی شود. سرعت ورودی بالاتر مجموعه بازده‌های بالاتری برای سیکلون مورد نظر می‌دهد، اما این همچنین افت فشار را در میان سیکلون افزایش می‌دهد؛ بنابراین با سبک سنگین کردن باید ساخت ما در مابین بازده مجموعه بالا و افت فشار پایین در سیکلون باشد. در این مطالعه محاسبات افت فشار به وسیله CFD و مقایسه با 4 مدل تجربی از شفرد و لپیل، کاسال و مارتینز، دیرقو و کوکر انجام شد [4].

شلی و همکاران (2005) در زمینه مطالعه مقایسه‌ای جریان فاز پیوسته در یک جداکننده سیکلونی با استفاده از مدل‌های مختلف توربولانس پژوهشی انجام دادند. مطالعه آن‌ها شامل پیش‌بینی مشخصه‌های جریان گاز در نوع قرارگیری مخروط و مدل‌سازی توربولانس با در نظرگیری معادلات حاکم بود. مقایسه‌ای نیز بین سه مدل آشفته  $k-\epsilon$  و RSM و LES انجام شد [5]. ژیانگ و لی (2005) شبیه‌سازی عددی الگوهای جریان در سیکلون‌هایی با ابعاد مخروط مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. دقت شبیه‌سازی به وسیله مقایسه با نتایج تجربی مورد تأیید قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ابعاد مخروط به‌طور چشم‌گیری الگو جریان در داخل سیکلون‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهد [6].

مینزا و همکاران (2006) در مورد رفتار سیال در سیکلون سه‌محصوله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جریان عمومی در سیکلون کاملاً قابلیت شبیه‌سازی را دارا است و سرعت‌های موضعی از سیکلونی به سیکلون دیگر متفاوت است؛ هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن یک ایجادکننده گردابه به مجموعه تأثیر قابل توجهی را روی سرعت مماسی دارد، درحالی‌که خود ایجادکننده گردابه داخلی باعث تغییر اساسی در سرعت محوری می‌گردد [7].

اودایا و همکاران (2007) یک مطالعه‌ی CFD روی مشخصات جریان در حال حرکت در داخل سیکلون انجام داده و با نتایج تجربی تطبیق دادند، آن‌ها بر اساس تطبیقات انجام داده به این نتیجه رسیدند که در مدل‌های آشفته، مدل RSM، بیشترین سازگاری را با نتایج تجربی دارا هست [8]. وان و همکاران (2008) مطالعه‌ای را با موضوع شبیه‌سازی تمرکز ذرات جامد با اندازه‌های مختلف را در جداساز سیکلونی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سیالیت گاز به‌طور قابل توجهی با شدت ذرات جامد تغییر می‌کند [9].

رئوفی و همکاران (2008) شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی جریان سیال در ایجاد کننده گردابی سیکلون را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه آن‌ها شامل چهار شکل مختلف استوانه و شش شکل مختلف ایجاد کننده گردابی با طول‌های مخروط مختلف بود. نتایج عددی در انتها با نتایج تجربی مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده گردید [10]. السید (2011) مدل‌سازی عددی را در زمینه سیالیت و عملکرد در سیکلون‌ها با قطرهای مختلف نوک مخروط انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که قطر نوک مخروط تأثیر غیرقابل توجهی روی الگوی سیال و عملکرد دارد. زمانی که قطر نوک مخروط کاهش می‌یابد، سرعت مماسی بیشینه به آرامی کاهش می‌یابد، در حالتی که وضعیت اصلی اغلب همان است. هم‌چنین بیان کردند کاهش قطر نوک مخروط، افت فشار را به آرامی افزایش می‌دهد [11].

رضوانی‌وند فنائی و نیکبخت (2015) در مورد تأثیر قطر ذرات دانه‌ای بر روی عملکرد یک سیکلون جداکننده، مطالعه‌ای را انجام دادند. آن‌ها از یک رویکرد لاگرانژی جدید به نام مدل فاز گسسته برای شبیه‌سازی جریان جامد در داخل جریان سیال استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش قطر ذرات دانه‌ای افت فشار افزایش می‌یابد. همچنین افزایش قطر ذرات، باعث افزایش توزیع اندازه سرعت بر روی کانتور خروجی گردید [12]. دمیر و همکاران (2016) بر روی ارتفاع استوانه‌ای و مخروطی و اثر بر روی فشار و سرعت سیکلون‌ها مطالعه‌ای انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که افت فشار تابع مربع سرعت ورودی است [13].

واسیلسکی (2017) مطالعه‌ای در مورد تجزیه و تحلیل اثر محل یک محفظه اضافی در قالب یک مخروط در بخش انتهایی سیکلون انجام داد که در این تحقیق از معادلات ناویر-استوکس و مدل آشفته رینولدز استفاده کردند و در یافتند که ابعاد هندسی دقیق در سیکلون-ها به دلیل اینکه به‌طور مستقیم در بازده سیکلون و اغلب در هزینه‌های عملیاتی تأثیر دارند حائز اهمیت است و به‌طور عمده باید یک توافق بین بازده بالا و کاهش افت فشار وجود داشته باشد [14]. ژو و همکاران (2018) در مورد بررسی تجربی و CFD اثرات زبری سطحی بر روی عملکرد سیکلون مطالعاتی انجام دادند که نتایج این مطالعات این شد که اثرات زبری سطحی بر افت فشار در سرعت‌های پایین ناچیز است و در سرعت‌های بالاتر افت فشار کاهش می‌یابد [15].

هوانگ و همکاران (2018) بر روی بار جرمی ذرات و اثر آن‌ها بر روی هیدرودینامیک و بازده جداسازی سیکلون مطالعه‌ای انجام دادند و دریافتند هنگامی که بار جرمی بیشتر از  $500 \text{ g/m}^3$  است، افت فشار در طول سیکلون کاهش می‌یابد و سرعت مماسی گاز با افزایش بار جرمی ذره کاهش می‌یابد [16].

لذا یک بررسی جامع برای مطالعه جریان سیال در داخل سیکلون به همراه گندم می‌تواند مفید باشد. علاوه بر مطالعه جریان، تأثیر سرعت ورودی مواد بر روی عملکرد (افت فشار و بازده جداسازی) و همچنین بر روی اندازه سرعت در داخل سیکلون سودمند خواهد بود.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم به‌صورت زیر نوشته می‌شود؛ معادله 1 قانون بقای جرم و معادله 2 قانون بقای مومنتوم را توصیف می‌کنند.

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_j \quad (2)$$

که  $\rho$  چگالی،  $P$  فشار استاتیک،  $\bar{v}$  تانسور تنش و  $\rho g_j$  نیروهای حجمی هستند. همچنین  $\bar{u}_i$  سرعت میانگین و  $u'_i$  سرعت نوسانی می‌باشند.

### تنظیمات حلگر

انتخاب حلگر در نرم‌افزار انسیس فلونت توسط مقدار عدد ماخ انجام می‌شود. طبق تعریف، عدد ماخ سرعت یک جسم در یک سیال به سرعت صوت در همان سیال است. اگر عدد ماخ کمتر از 0/3 باشد به معنی تراکم‌ناپذیر بودن جریان و در صورت اینکه بیشتر از 0/3 باشد به معنی تراکم‌پذیر بودن جریان است. در شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلونت برای محیط‌های تراکم‌ناپذیر از حلگر بر مبنای فشار و برای محیط‌های تراکم‌پذیر از حلگر بر مبنای چگالی استفاده می‌گردد. در این مطالعه، با توجه عدد ماخ پایین جریان از حلگر بر مبنای فشار استفاده می‌شود.

### مدل آشفته

در شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسبات همواره انتخاب مدل مناسب برای حصول نتایج دقیق از شبیه‌سازی‌ها امر بسیار مهمی است. مدل‌های ناویر استوکس رینولدز میانگین‌گیری شده (RANS) به صورت رایج در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان می‌دهند. در این مطالعه، مدل انتقال تنش برشی (SST) که ترکیبی از مدل‌های آشفتگی  $k-\omega$  و  $k-\epsilon$  است برای شبیه‌سازی آشفتگی در داخل جریان مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مدل SST  $k-\omega$  از تقریب بوسینسک برای ارتباط بین تنش رینولدز با نرخ‌های تغییر شکل میانگین در قالب رابطه 3 استفاده می‌کند.

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

که  $\tau_{ij}$  تانسور تنش (Pa)،  $\rho$  چگالی ( $\text{kg.m}^{-3}$ )، اجزای سرعت در جهت مطلوب ( $\text{m.s}^{-1}$ )،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی (Pas) و  $S$  نرخ کرنش ( $\text{s}^{-1}$ ) است.

حالت باقیی معادله حالت برای هر دو معادله انرژی جنبشی تلفات ( $k$ ) و نرخ اضمحلال ویژه ( $\omega$ ) بصورت زیر بیان می‌شود.

$$\rho \frac{\partial (k)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial (\omega)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j \omega)}{\partial x_j} = P_k \frac{\rho}{\mu_t} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

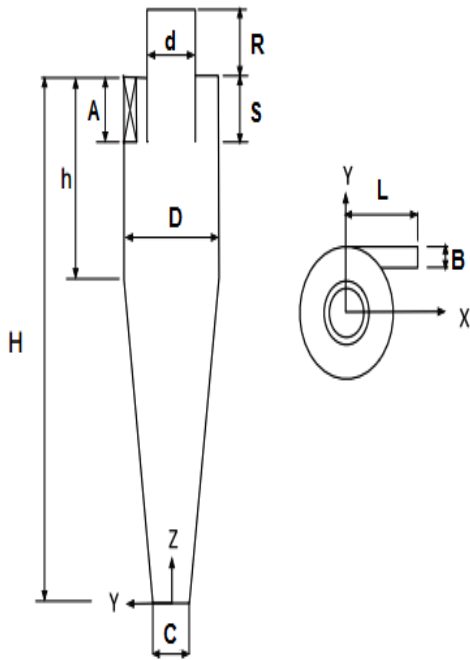
که در آن  $\sigma_k$  و  $\sigma_\omega$  اعداد پراوتل آشفته به ترتیب برای  $k$  و  $\omega$  هستند. همچنین  $P_k$  تولید انرژی جنبشی آشفتگی با در نظر گرفتن گرادیان سرعت هست و بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \left[ \mu_t \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

که در رابطه 6،  $\mu_t$  ویسکوزیته آشفته است [17].

## مواد و روش‌ها

سیکلون مورد استفاده در تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی یک سیکلون استرماند است که مشخصات هندسی و ابعاد فیزیکی آن به ترتیب در شکل 1 و جدول 1 ارائه شده است.



شکل 1- ابعاد و پارامترهای سیکلون مورد آزمایش

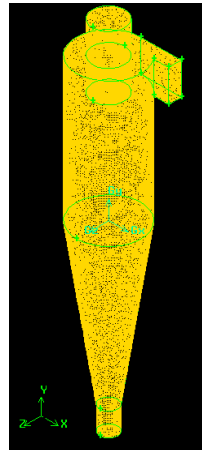
جدول 1- اندازه بخش‌های مختلف سیکلون

پارامترها	اندازه (سانتی‌متر)
قطر بدنه (D)	55
قطر خروجی گاز (d)	27/5
ارتفاع ورودی (A)	27/5
عرض ورودی (B)	11
طول داکت خروجی گاز (R)	27/5
ارتفاع کل (H)	220
ارتفاع بخش استوانه‌ای (h)	82/5
قطر بخش خروجی دانه (C)	15/1
ارتفاع گردابه یاب (S)	27/5
طول ورودی (L)	35

برای طراحی و شبیه‌سازی سیکلون از نرم‌افزارهای گمبیت و انسیس فلونت استفاده شد. مراحل ایجاد هندسه، شبکه بندی و تعریف شرایط مرزی در نرم‌افزار گمبیت انجام گرفت و در ادامه برای انجام شبیه‌سازی‌ها وارد نرم‌افزار انسیس فلونت گردید.

## مش بندی

مش بندی سیکلون مورد استفاده در مطالعه در شکل 2 ارائه شده است. همانطوری که قابل مشاهده است از مش منظم شش وجهی برای مش بندی استفاده گردید.



شکل 2- مش بندی سیکلون مورد استفاده

## شرایط مرزی

تعریف مناسب شرط مرزی در مدل سازی آشفته جریان تأثیر عمده‌ای بر نتایج شبیه سازی عددی می گذارد. شرایط فیزیکی مسئله و روابط ریاضیاتی، پارامترهای کلیدی در انتخاب شرایط مرزی دقیق دارد. شرایط مرزی استفاده شده در شبیه سازی‌ها در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2- شرایط مرزی مورد استفاده

مقدار / شرط	نوع شرط مرزی
$m.s^{-1}$	سرعت ورودی
فشار اتمسفر	فشار خروجی
وضعیت عدم لغزش	دیواره

همچنین مدل اولیری-لاگرانژ استفاده شده برای شبیه سازی استفاده شده است. ویژگی های فاز جامد به کار رفته در مدل DPM شامل چگالی، کمترین قطر، بیشترین قطر و همچنین قطر میانگین در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3- مشخصات فاز جامد

مقدار	ویژگی
$790 kg/m^3$	چگالی
0/2 m	کمترین قطر
0/8 m	بیشترین قطر
0/5 m	قطر میانگین

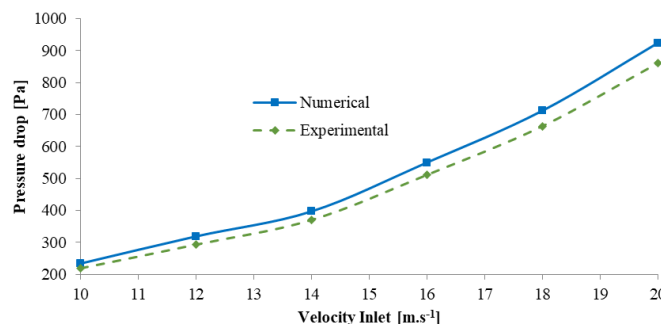
## تحلیل نتایج

### آزمون استقلال از شبکه

برای آزمون استقلال از شبکه سیکلون از 4 سطح اندازه استفاده گردید. تعداد سلول‌ها 4 سطح یاد شده 612600، 425700، 812410 و 1146100 عدد مش را شامل شدند. طبق نتایج شبیه‌سازی تفاوت بین افت فشار بین ورودی و خروجی گردابه یاب بعد از مش با تعداد 812410 مش‌بندی تقریباً ثابت می‌ماند و در مقایسه دو سطح مش 812410 و 1146100 نیز کمتر از 2٪ بود. در نتیجه به دلیل صرفه جویی در زمان، تعداد 812410 عدد مش برای شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

## اعتبار سنجی

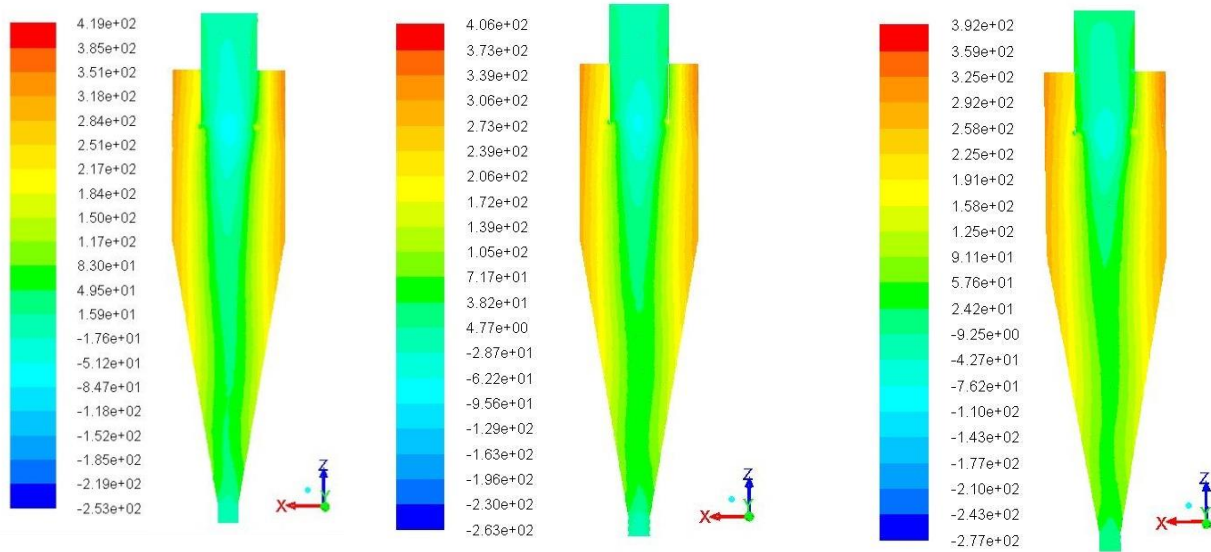
از داده‌های مربوط به افت فشار به ازای سرعت‌های مختلف که توسط اختلاف فشار سنج و به صورت تجربی اندازه گرفته شد و نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی استفاده گردید. از شکل 6 قابل مشاهده است که مقادیر افت فشار از تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخوردار بود.



شکل 3- نمودار مقایسه‌ای برای اعتبارسنجی بین مدل و داده‌های تجربی

## افت فشار

از افت فشار می‌توان به عنوان مهم‌ترین عامل در بررسی عملکرد یک سیکلون نام برد. افت فشار به صورت اختلاف بین فشار ورودی و خروجی سیکلون تعریف می‌گردد. افزایش میزان نرخ جریان جرمی مواد ورودی به سیکلون می‌تواند تأثیر مستقیمی بر روی مقدار افت فشار و در ادامه بر روی عملکرد سیکلون بگذارد. با مراجعه به شکل 4 می‌توان دریافت که مقدار فشار استاتیک در امتداد خروجی‌های سیکلون دارای کمترین مقدار و در نزدیکی دیواره‌ها دارای بیشینه مقدار است. همچنین قابل مشاهده است که با افزایش نرخ جریان جرمی، مقدار افت فشار یک روند کاهشی را دارا هست. بیشترین فشار استاتیک برای جریان جرمی 0/01 کیلوگرم بر ثانیه با مقدار 419 پاسکال و کمترین مقدار آن به جریان جرمی 0/1 کیلوگرم بر ثانیه با مقدار 392 پاسکال تعلق دارد.



$$\dot{m} = 0.01 \text{ kg.s}^{-1}$$

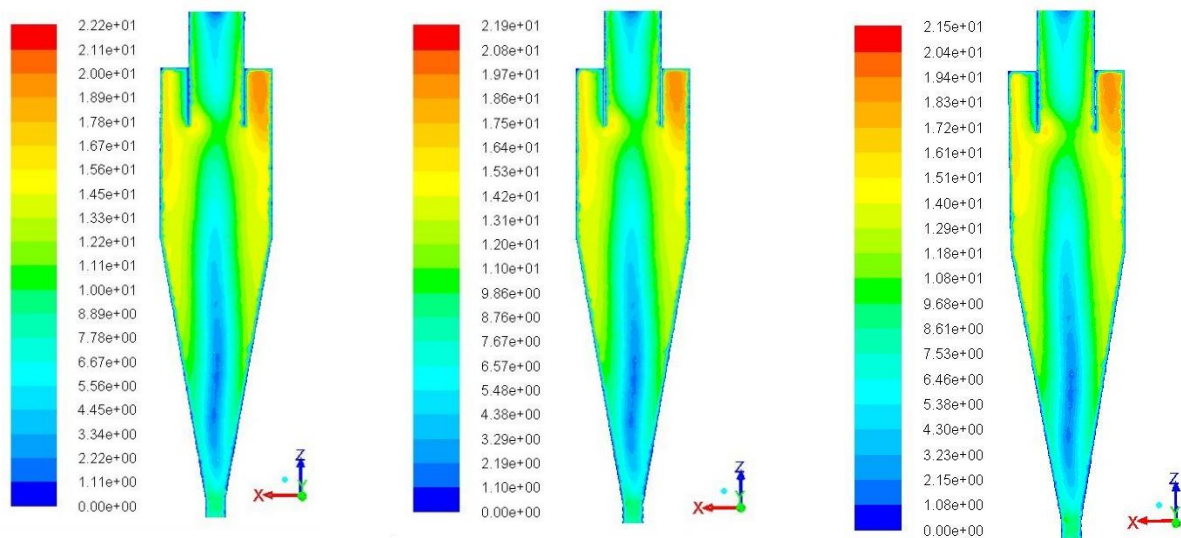
$$\dot{m} = 0.05 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m} = 0.1 \text{ kg.s}^{-1}$$

شکل ۴- کانتور افت فشار برای مقادیر مختلف نرخ جرمی ورودی

#### اندازه سرعت

در مطالعه سیکلون‌ها، مطالعه سرعت به واسطه ارتباط تنگاتنگ آن با فشار از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به افزایش نرخ جریان جرمی و ثابت بودن سرعت ورودی، مقدار اندازه سرعت افزایش می‌یابد. مطابق با شکل ۵، بیشینه سرعت برای نرخ جریان جرمی 0/01 کیلوگرم بر ثانیه، 22/2 متر بر ثانیه است که این مقدار برای نرخ جریان جرمی 0/05 کیلوگرم بر ثانیه مقدار 21/9 متر بر ثانیه و برای نسبت جریان جرمی 0/1 کیلوگرم بر ثانیه 21/5 متر بر ثانیه هست که روند کاهش بیشینه اندازه سرعت به ازای افزایش نرخ جریان جرمی ورودی را به خوبی نشان می‌دهد.



$$\dot{m} = 0.01 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m} = 0.05 \text{ kg.s}^{-1}$$

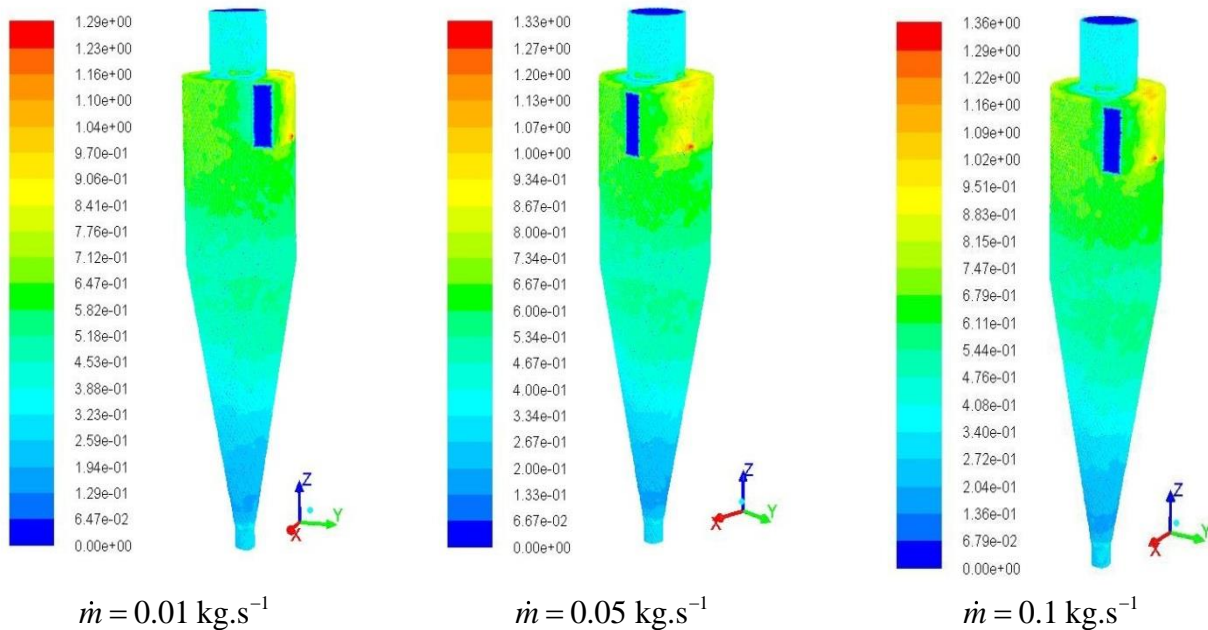
$$\dot{m} = 0.1 \text{ kg.s}^{-1}$$

شکل ۵- کانتور اندازه سرعت برای مقادیر مختلف نرخ جرمی ورودی



### تنش برشی دیواره

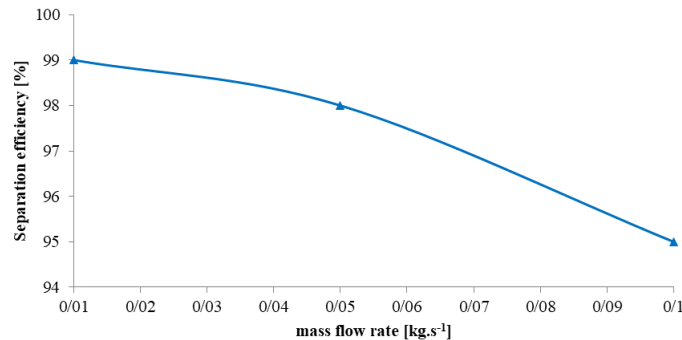
تنش برشی دیواره بصورت اساسی، بوسیله سرعت چرخشی جریان بر روی دیواره تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مقادیر بالای تنش برشی دیواره برای یک سیکلون عامل مخربی خواهد بود. مقدار بیشینه تنش برشی دیواره در بخش ورودی سیکلون اتفاق می‌افتد، که مومنتوم بالای جریان را می‌توان به عنوان یکی از دلایل اصلی برای این اتفاق نام برد. با مشاهده شکل 6 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ جرمی مواد ورودی به داخل سیکلون، تغییرات تنش برشی نیز یک روند صعودی داشته و از مقدار  $1/29$  پاسکال برای دبی جرمی  $0/01$  کیلوگرم بر ثانیه به مقدار  $1/36$  پاسکال برای دبی جرمی  $0/1$  کیلوگرم بر ثانیه رسیده است.



شکل 6- کانتور تنش برشی دیواره برای مقادیر مختلف نرخ جرمی ورودی

### بازده جداسازی

بازده جداسازی که به صورت نسبت جرمی ذرات جداسازی شده به کل ذرات ورودی به داخل سیکلون تعریف می‌گردد، یکی از عوامل تاثیرگذار بر روی عملکرد یک سیکلون است. همانطوری که از شکل 7 قابل مشاهده است با افزایش دبی جرمی مواد ورودی به داخل سیکلون، بازده جداسازی روند کاهشی را نشان می‌دهد و از مقدار 99 درصد برای دبی جرمی  $0/01$  کیلوگرم بر ثانیه به مقدار 95 درصد برای دبی  $0/1$  کیلوگرم بر ثانیه رسیده است. همچنین مقدار بازده جداسازی برای دبی جرمی  $0/05$  کیلوگرم بر ثانیه، مقدار 98 درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار بازده جداسازی به ازای مقادیر مختلف نرخ جرمی ورودی

### نتیجه گیری

در این مطالعه عملکرد یک سیکلون استرماند حامی گندم تحت تأثیر تغییرات نرخ جرمی جریان مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد سیکلون به وسیله پارامترهای افت فشار و بازده جداسازی در کنار مطالعه اندازه سرعت و همچنین تنش برشی دیواره بصورت جامع مورد بررسی قرار گرفتند و تأثیرات تغییر نرخ جریان جرمی شامل مقادیر 0/01، 0/05 و 0/1 کیلوگرم بر ثانیه بر روی هر کدام از موارد ذکر شده بررسی شد. به دلیل اینکه از نظر مهندسی بایستی یک مصالحه بین مقادیر مربوط به افت فشار و بازده جداسازی انجام گردد بر اساس نتایج بدست آمده، نرخ جریان جرمی 0/01 کیلوگرم بر ثانیه به عنوان نرخ جریان جرمی مناسب جهت ورود سیال از بخش مربوطه انتخاب گردید.

نتایج نشان داد که با افزایش نرخ جریان جرمی، مقدار افت فشار در داخل سیکلون کاهش می‌یابد. همچنین در مورد اندازه سرعت نیز روند کاهش اندازه سرعت به ازای افزایش نرخ جریان جرمی بدست آمد. بازده جداسازی نیز روند مشابهی را نشان داد و از مقدار 99 درصد برای 0/01 کیلوگرم بر ثانیه به 95 درصد برای 0/1 کیلوگرم بر ثانیه رسید.

در زمینه تنش برشی دیواره شرایط متفاوت بود و به دلیل بالا رفتن مقدار برخورد ناشی از افزایش نرخ جریان جرمی، با افزایش نرخ جریان جرمی مقدار تنش برشی دیواره افزایش یافت. می‌توان نتیجه گرفت که دینامیک سیالات محاسباتی و مدل SST k-w مدل آفتگی مناسبی برای شبیه سازی جریان در داخل سیکلون است.

### منابع

- Hoffmann, A.C., Stein, L.E. 2007. Gas cyclones and swirl tubes : principles, design, and operation. Springer.
- Malalasekera, W., Versteeg, H.K. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. Pearson Education.
- Slack, M.D., Prasad, R.O., Bakker, A., Boysan, F. 2000. Advances in Cyclone Modelling Using Unstructured Grids. Chem. Eng. Res. Des, 78: 1098-1104.
- Gimbun, J., Chuah, T.G., Fakhru'l-Razi, A., Choong, T.S.Y. 2005. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study. Chem. Eng. Process. Process Intensif, 44: 7-12.
- Shalaby, I. Pachler, K., Wozniak, K., and Wozniak, G. 2005. Comparative study of the Continuous phase flow in a cyclone separator using different turbulence models. International journal for numerical methods in fluids, 48(11): 1175- 1197.
- Xiang, R.B., Lee, K.W. 2005. Numerical simulation of flow patterns in cyclones of different cone dimensions. Particle and Particle Systems Characterization, 22 (3): 212-218.



7. Mainza, A., Narasimha, M., Powell, M.S., Holtham, P.N., Brennan, M. 2006. Study of flow behavior in a three-product cyclone using computational fluid dynamics, *Minerals Engineering*, 19: 1048-1058.
8. Udaya, B.K., Rama, M.Y., Ravi, R.M., Tiwari, S., Srivastava, J.K., Ramakrishnan, N. 2007. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclones, *Minerals Engineering*, 20(1), 60-71.
9. Wan, G., Sun, G., Xue, X., Shi, M. 2008. Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*, 183: 94-104.
10. Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., Ebrahimi, R. 2008. Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47 (1): 128-137.
11. Elsayed, K., Iacor, C. 2011. Numerical modeling of the flow fields and performance in cyclones of different cone-tip diameters, *Computers & Fluids*, 51(1): 48-59.
12. Rezvanivandefanayi, A. and Nikbakht, A. M. 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.
13. Demir, S., Karadeniz, A., Aksel, M., 2016. Effects of cylindrical and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones. *Powder Technology*, 295: 209-217.
14. Wasilewski, M., 2017. Analysis of the effect of counter-cone location on cyclone separator efficiency. *Separation and Purification Technology*, 179: 236-247.
15. Zhou, F., Sun, G., Zhang, Y., Ci, H., Wei, Q. 2018. Experimental and CFD study on the effects of surface roughness on cyclone performance. *Separation and Purification Technology*, 193: 175-183.
16. Huang, A.-N., Ito, K., Fukasawa, T., Fukui, K. 2018. Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 90: 61-67
17. ANSYS FLUENT Theory Guide. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 18.2 15317, 373-464.



## Numerical investigation of the influence of input wheat mass flow rate on cyclone performance

Sajed Naiemi Dizajyekan<sup>1</sup>, Gholamhosseinn Shahgholi<sup>2\*</sup>, Adel Rezvanivand Fanaei<sup>3</sup> and, Vahid Rostampour<sup>4</sup>

1. Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
2. Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
3. Department of Biosystems Engineering, Urmia University
4. Department of Biosystems Engineering, Urmia University

### Abstract

Cyclones according to a simple structure, low cost of construction and maintenance, ease of use and flexibility have found a variety of applications in industry and agriculture. The mass flow rate to the cyclone is one of the important factors affecting the performance of a cyclone (pressure drop and separation efficiency). The computational fluid dynamics method and the SST k-ε model were used to simulate the turbulent flow within the cyclone. Pressure drop data were used to validate the experimental and numerical results, which revealed excellent agreement. For the three levels of mass flow rate including 0.01, 0.05 and 0.1 kg.s<sup>-1</sup> and inlet speed of 16 m / s, the results of pressure drop, velocity magnitude as well as separation efficiency were obtained. Also, the strain rate was studied at all three levels of mass flow rates. The separation efficiency decreased with increasing the inlet mass flow rate and decreased from 99% for 0.01 kg.s<sup>-1</sup> mass flow to 95% for 0.1 kg.s<sup>-1</sup> mass flow rate.

**Key words:** Greenhouse; Shading; Computational Fluid Dynamics; ANSYS Fluent; Pressure Drop

\*Corresponding author

E-mail: Gshahgoli@yahoo.com