



## مطالعه عملکرد یک سیکلون جداکننده در بخش فرآوری آرد

احسان آقایی بدلبو<sup>۱</sup>، وحید رستم پور<sup>۲\*</sup>، عادل رضوانی وند فنائی<sup>۳</sup>، علی محمد نیکبخت<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی (aghaei95@yahoo.com)
۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی (v.rostampour@urmia.ac.ir)
۳. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه (a.rezvanivand@urmia.ac.ir)
۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه ارومیه (a.nikbakht@urmia.ac.ir)

### چکیده

در این مطالعه یک نوع سیکلون جداکننده مورد استفاده در صنعت آرد به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. از مدل آشفتگی مدل تنش‌های رینولدز (RSM) برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان و از حل گر نوع بر پایه فشار برای حل معادلات بهره برده شده است. ویژگی‌های عملکردی سیکلون شامل افت فشار و بازده جداسازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین علاوه بر موارد ذکر شده، کانتورهای اندازه سرعت، شدت آشفتگی و سایش دیواره برای سیکلون مورد مطالعه استخراج شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که دینامیک سیالات محاسباتی به خوبی می‌تواند جریان در داخل سیکلون استفاده شده در صنعت آرد را شبیه‌سازی کرده و اطلاعات مفیدی را استخراج نماید.

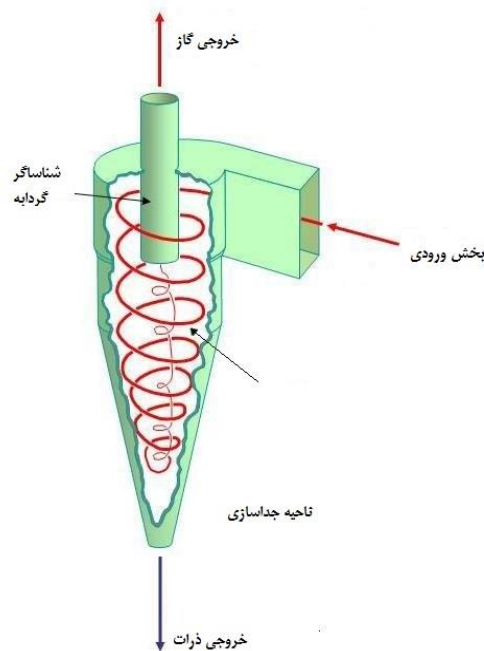
**کلمات کلیدی:** آنسیس فلونت؛ افت فشار؛ بازده جداسازی؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ مدل تنش‌های رینولدز

\*نویسنده مسئول: v.rostampour@urmia.ac.ir

## مطالعه تأثیر دبی جریان بر عملکرد سیکلون جداکننده آرد

### مقدمه

سیکلون سیکلون جداکننده یک دستگاه مکانیکی ساکن به شمار می‌رود که از نیروی گریز از مرکز برای جداسازی ذرات جامد از گاز حامل استفاده می‌کند. جریان از بخش ورودی وارد سیکلون می‌شود که باعث ایجاد یک حرکت مارپیچی محوری در گاز شده و یک میدان نیروی گریز از مرکز سبب پایین آمدن ذرات در امتداد مسیر گردد و در نتیجه باعث سقوط مواد به صورت مارپیچی به سمت پایین می‌شود. ذرات جمع شده می‌توانند از بخش لوله خروجی مخصوص خارج شوند؛ در شرایطی که فاز گاز، حرکت محوری مسیر خود را معکوس کرده و از بخش خروجی گاز (گردابه یا ب) خارج می‌گردد. یک سیکلون نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱- اساس عملکرد یک سیکلون

اساس کار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) تبدیل معادلات حاکم بر سیالات به روابط جبری است. این روش می‌تواند برای مدل‌سازی جریان سیال، انتقال جرم، انتقال حرارت و مومنتوم و طراحی در بخش کشاورزی استفاده شود. 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 [۲].

لوزیا و لیث (۱۹۸۹) پارامترهای طراحی سیکلون، شامل قطر خروجی گاز را برای بهبود عملکرد سیکلون با برنامه بهینه‌سازی خودشان، بهینه‌سازی کردند [۳]. کیم و لی (۱۹۹۰) توصیف کردند که چگونه نسبت ابعاد بدنه سیکلون ( $D$ ) و ایجاد کننده گردابه ( $D_x$ ) روی بازده جداسازی و افت فشار سیکلون تأثیر می‌گذارد و یک سیکلون با ویژگی‌های طراحی انرژی مؤثر پیشنهاد دادند [۴]. لیم و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر شکل ایجاد کننده گردابه را روی بازده جداسازی در مورد نرخ‌های مختلف سیالیت و البته بدون هیچ توضیحی در مورد تأثیر روی الگوی جریان و پروفیل‌های سرعت به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند [۵].

<sup>1</sup> Vortex finder



ژیانگ و لی (۲۰۰۵) شبیه‌سازی عددی الگوهای جریان در سیکلون‌هایی با ابعاد مخروط مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. اعتبار شبیه‌سازی به وسیله مقایسه با نتایج تجربی مورد تأیید قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ابعاد مخروط به طور چشم‌گیری الگوی جریان در داخل سیکلون‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶].

گیمبون و همکاران (۲۰۰۶) مطالعه‌ای را در مورد تأثیر ابعاد مخروط روی نمونه‌گیری عملکرد ایرو سیکلون‌ها و هیدروسیکلون‌ها انجام دادند که نشان داد انسیس فلونت با مدل اغتشاشی RSM افت فشار را در سیکلون‌های با ابعاد مخروط مختلف بهتر پیش‌بینی می‌کند و دریافتند این مدل برای تحلیل رفتار مواد در داخل سیکلون مناسب می‌باشد [۷].

وانگ و همکاران (۲۰۰۶) یک مطالعه عددی جریان مواد ریز جامد در جداکننده سیکلونی انجام دادند و گزارش کردند که روش تنش‌های رینولدز استفاده‌شده در شبیه‌سازی قابلیت کاربردی بالایی از نظر اعتبار سنجی دارد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی انطباق خوبی دارد. این انطباق مخصوصاً در زمینه فشار و مسیر سیال خود را به خوبی نشان می‌دهد. بر این اساس یک مدل لاگراژی برای پیش‌بینی مسیر حرکتی سیال استفاده کردند و با نتایج تجربی مقایسه نمودند در نتیجه این تحقیق، صحت نتایج CFD نشان داده شد [۸].

رضوانی و نند فنائی و همکاران (۱۳۹۲) جریان داخل یک سیکلون را داخل یک سیکلون جداکننده مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها فاز سیال شامل هوا و ذرات آرد بود. از مدل تنش‌های رینولدز برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده افت فشار و مسیر حرکت جریان بودند. نتایج برای سه سطح سرعت و سه سطح نرخ جرمی مواد ارائه شد [۹].

السید و لاکور (۲۰۱۱) 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 حالی که وضعیت اصلی اغلب همان است. هم‌چنین بیان کردند کاهش قطر نوک مخروط، افت فشار را به آرامی افزایش می‌دهد [۱۰].

برار و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر قطر گردابه‌یاب بر روی الگوی جریان و کارایی جداسازی را با ۵ قطر مختلف مورد مطالعه قرار دادند و نتایج مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش قطر گردابه‌یاب افت فشار، بازده سیستم، سرعت محوری و سرعت مماسی کاهش می‌یابد و با کاهش قطر گردابه‌یاب پارامترهای مذکور افزایش پیدا می‌کنند. در حالت کلی دو پارامتر اصلی در بحث سیکلون یعنی بازده سیستم و افت فشار با کاهش قطر گردابه‌یاب افزایش می‌یابد [۱۱].

رضوانی و نند فنائی و نیکبخت (۲۰۱۵) در مورد تأثیر قطر ذرات دانه‌ای بر روی عملکرد یک سیکلون جداکننده، مطالعه‌ای را انجام دادند. آن‌ها از یک رویکرد لاگراژی 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 کانتر خروجی گردید [۱۲].

پی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر گردابه‌یاب با داشتن تیغه‌های متقاطع شکل بر روی بازده جداسازی سیکلون را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که ۴ تیغه با عرض ۱۰ میلی‌متر در داخل گردابه‌یاب می‌تواند افت فشار را به میزان قابل توجهی به اندازه ۱۶/۴۱٪ کاهش دهد و بازده جداسازی را ۰/۶۴٪ بهبود ببخشد. این تیغه‌ها سرعت مماسی را افزایش می‌دهند و توسعه حداکثر سرعت مماسی بازده جداسازی را بهبود می‌بخشد. شدت آشفتگی در گردابه‌یاب و گرداب داخلی تأثیر کمی بر روی بازده جداسازی دارد و افزایش شدت آشفتگی در گرداب بیرونی بازده جداسازی را کاهش می‌دهد [۱۳].

ژو و همکاران (۲۰۱۸) 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 [۱۴].

با توجه به کارهای صورت گرفته و مطالب کلی بیان شده در زمینه مطالعات انجام شده، مطالعه ای شامل بررسی عملکرد سیکلون مورد استفاده در خط تولید آرد به همراه مطالعه جریان‌یابی مواد در داخل سیکلون و همچنین بررسی عملکرد سیکلون در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

### میدان فشار در داخل سیکلون

در صورتی که رابطه بین فشار استاتیک ( $P_s$ ) و فشار دینامیک ( $P_d$ ) به صورت واضح بیان گردد، جریان و توزیع فشار در داخل سیکلون براحتی قابل درک خواهد بود. معادله برنولی برای جریان پایا و بدون اصطکاک، که دارای چگالی ثابتی است، می‌تواند از معادله-ناویر استوکس استخراج گردد، رابطه ۱ را (در راستای خط جریان) بیان می‌کند:

$$\frac{P}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 = cte \quad (1)$$

در این رابطه، فشار استاتیک و فشار دینامیکی (که معمولاً به صورت هد سرعت هم بیان می‌گردد) به عنوان عبارات اول و سوم رابطه (۱) ارائه شده‌اند [۱]. عبارت دوم نسبت به دو عبارت دیگر در سیکلون‌های گازی اهمیت چندانی ندارد، چون که چگالی سیال نسبتاً پایین بوده و اختلاف ارتفاع زیاد نمی‌باشد.

### بازده جداسازی سیکلون

بازده جداسازی از جمله موارد بسیار مهم در عملکرد یک سیکلون است که به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{E_i - E_e}{E_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن  $E_i$  جرم ذرات آرد در ورودی و  $E_e$  جرم ذرات آرد در خروجی سیکلون می‌باشند. محاسبات بر مبنای کنترل مقدار ورودی و خروجی ذرات گندم است [۱].

### معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم برای حرکت سیال در داخل سیکلون به صورت زیر بیان می‌شود. معادله ۳ معادله پیوستگی (قانون بقای جرم) و معادله ۴ قانون بقای مومنوم (قانون دوم نیوتن) است.

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_j \quad (4)$$

که  $\rho$  چگالی،  $P$  فشار استاتیک،  $\bar{\tau}$  تانسور تنش و  $\rho g_j$  نیروهای حجمی هستند. همچنین  $\bar{u}_i$  سرعت میانگین و  $u'_i$  سرعت نوسانی می‌باشند [۱۵].

### مدل‌سازی آشفتگی

برای حصول نتایج دقیق از شبیه‌سازی‌ها، بایستی مدل آشفتگی مناسب انتخاب گردد. معادلات انتقال در مدل RSM به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k u_i' u_j') = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} + S \quad (5)$$

که  $\rho$  چگالی ( $\text{kg.m}^{-3}$ )،  $u$  اجزای سرعت در جهت مطلوب ( $\text{m.s}^{-1}$ ) و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی (Pas.s) است. در معادله ۵، دو عبارت سمت چپ به ترتیب مشتق زمانی محلی تنش و انتقال همرفتی هستند. همچنین عبارت دیفیوژن ( $D_{ij}$ ) تنش، به صورت رابطه ۶ بیان می‌گردد:

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + (\overline{p' u_j'}) \delta_{ik} + (\overline{p' u_i'}) \delta_{jk} - \mu \left( \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i' u_j'} \right) \right] \quad (6)$$

تولید برش ( $p_{ij}$ ) به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود:

$$p_{ij} = -\rho \left[ \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] \quad (7)$$

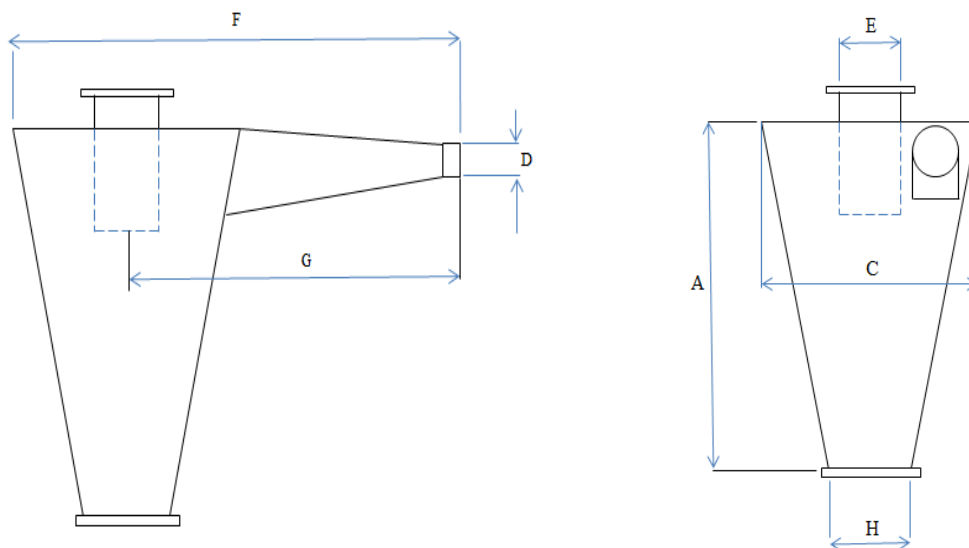
همچنین عبارت کرنش فشار به صورت رابطه ۸ بیان می‌گردد:

$$\Pi_{ij} = p \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

که S عبارت منبع است [۱۵].

### مواد و روش‌ها

سیکلون مورد استفاده در تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی به همراه مشخصات هندسی و ابعاد فیزیکی آن به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- ابعاد سیکلون مورد استفاده به صورت پارامتریک

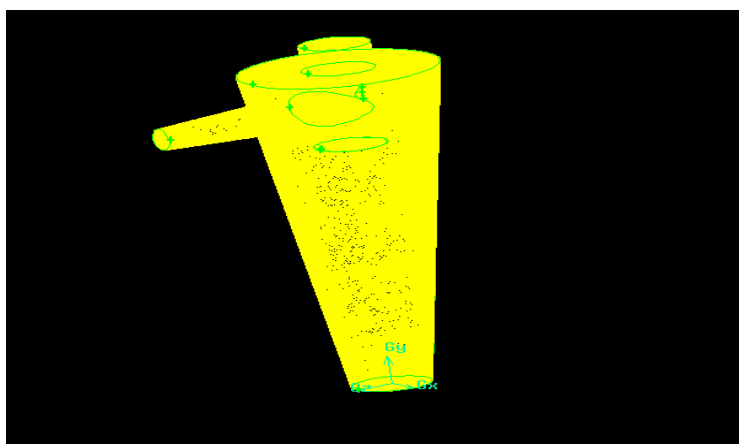
جدول ۱- اندازه بخش‌های مختلف سیکلون

بخش	A	B	C	D	E	F	G	H
اندازه (میلی‌متر)	۷۵۰	۱۸۰	۳۴۰	۵۶	۱۲۰	۶۵۰	۴۸۰	۱۳۵

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 شبیه‌سازی ها وارد نرم افزار انسیس فلونت گردید.

#### مش بندی

مش بندی سیکلون استفاده شده در مطالعه در شکل ۳ آورده شده است. همانطوری که قابل مشاهده است از مش هرمی برای مش بندی استفاده گردید. همچنین برای دستیابی به جواب های بهتر در مناطقی که نیاز بود، اعم از ورودی سیال و هم چنین خروجی ها از مش های ریزتر بهره استفاده شد.



شکل ۳- مش بندی سیکلون مورد استفاده

#### شرایط مرزی



تعریف مناسب شرط مرزی در مدل‌سازی آشفته جریان تاثیر عمده‌ای بر نتایج شبیه‌سازی عددی می‌گذارد. شرایط فیزیکی مسئله و روابط ریاضیاتی، پارامترهای کلیدی در انتخاب شرایط مرزی دقیق دارد. شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مدل اویلری-لاگرانژ برای شبیه‌سازی فاز جامد استفاده شده است.

جدول ۲- شرایط مرزی مورد استفاده

مقدار / شرط	نوع شرط مرزی
مقدار سرعت	سرعت ورودی
فشار جو	فشار خروجی
وضعیت عدم لغزش <sup>۲</sup>	دیواره

### تحلیل نتایج

بخش تحلیل نتایج به ترتیب بخش‌های مربوط به آزمون استقلال از شبکه از نظر تعداد مش، اعتبار سنجی نتایج عددی و تجربی، مطالعه افت فشار و بازده جداسازی به عنوان دو عامل تاثیر گذار بر عملکرد سیکلون و همچنین مطالعه تاثیر سرعت ورودی بر روی اندازه سرعت در داخل سیکلون را شامل می‌شود.

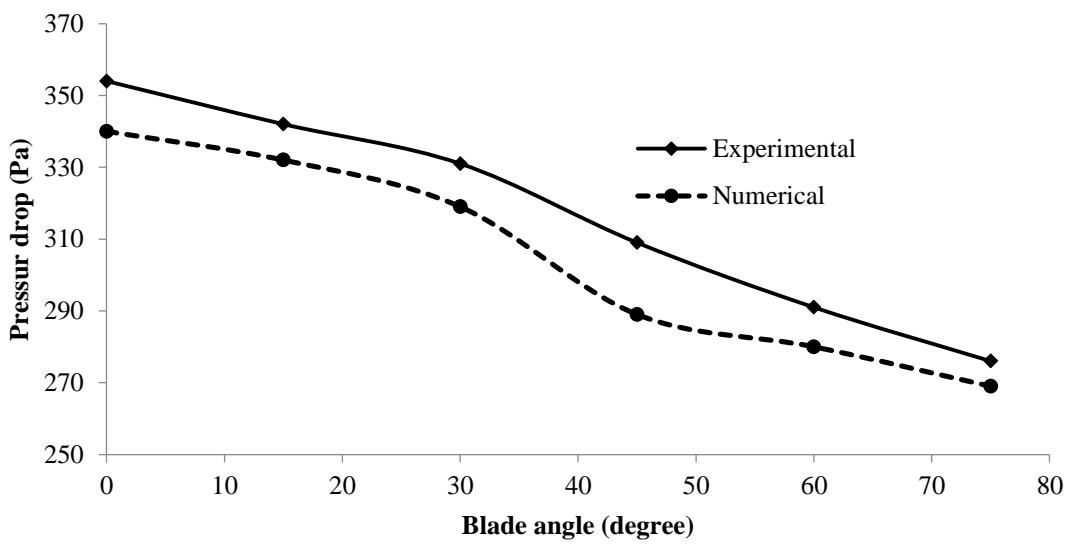
### آزمون استقلال از شبکه

برای اطمینان از استقلال شبکه از پنج سطح شبکه‌بندی در شبیه‌سازی سیکلون استفاده شد. در این پنج سطح بیان شده تعداد شبکه‌بندی‌ها ۱۹۶۸۱۰، ۲۸۳۱۲۰، ۴۲۷۸۹۰، ۶۳۴۹۴۰ و ۱۰۴۵۲۹۰ عدد مش بودند. نتایج نشان داد که اختلاف بین پارامتر افت فشار بین ورودی گاز و خروجی گردابه‌یاب در دو سطح مش ۴۲۷۸۹۰ و ۶۳۴۹۴۰ عدد مش کمتر از ۴٪ بود و بعد از آن افزایش تعداد مش تأثیری بر نتایج نداشت. بنابراین، به منظور صرفه‌جویی‌های زمانی در حل، شبکه با تعداد ۴۲۷۸۹۰ عدد مش به عنوان مش مورد استفاده در این مطالعه انتخاب گردید.

### اعتبار سنجی

شبیه‌سازی CFD برای قابل اعتماد بودن بایستی اعتبارسنجی شود. برای این منظور از داده‌های تجربی مربوط به افت فشار و همچنین نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی استفاده گردید. از شکل ۴ قابل مشاهده است که مقادیر افت فشار تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی از تطابق خوبی برخوردار بود.

<sup>2</sup> No slip Condition



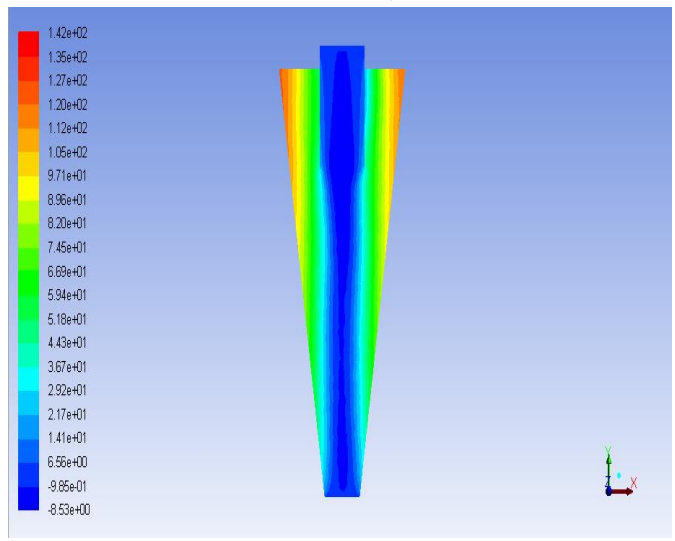
شکل ۴- اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌های تجربی

### افت فشار

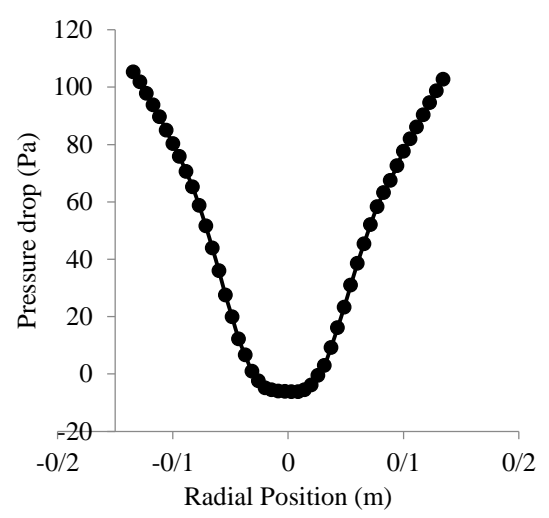
بحث افت فشار به عنوان یکی از عوامل موثر بر روی عملکرد سیکلون همواره از اهمیت فوق العاده‌ای در مورد تحلیل یک سیکلون برخوردار است. با توجه به ماهیت کاری سیکلون در امتداد خروجی‌های بالایی و پایینی سیکلون بایستی فشار پایینی ایجاد گردد تا سیکلون بتواند عمل جداسازی را به خوبی انجام دهد.

### فشار دینامیکی

در ادامه کانتور فشار دینامیک برای سطح بیان شده در شکل ۵ ارائه شده است. مهم‌ترین مسئله در این مورد، مشخص شدن نواحی دارای فشار دینامیکی بالا است، چرا که این مناطق در عملکرد سیکلون تاثیر گذار هستند. تاثیر فشار دینامیکی به واسطه مومنتوم بالای جریان در نقاط همراه با فشار دینامیکی بالاست. در این مناطق به واسطه سرعت بالا، جریان مومنتوم بالایی دارد.



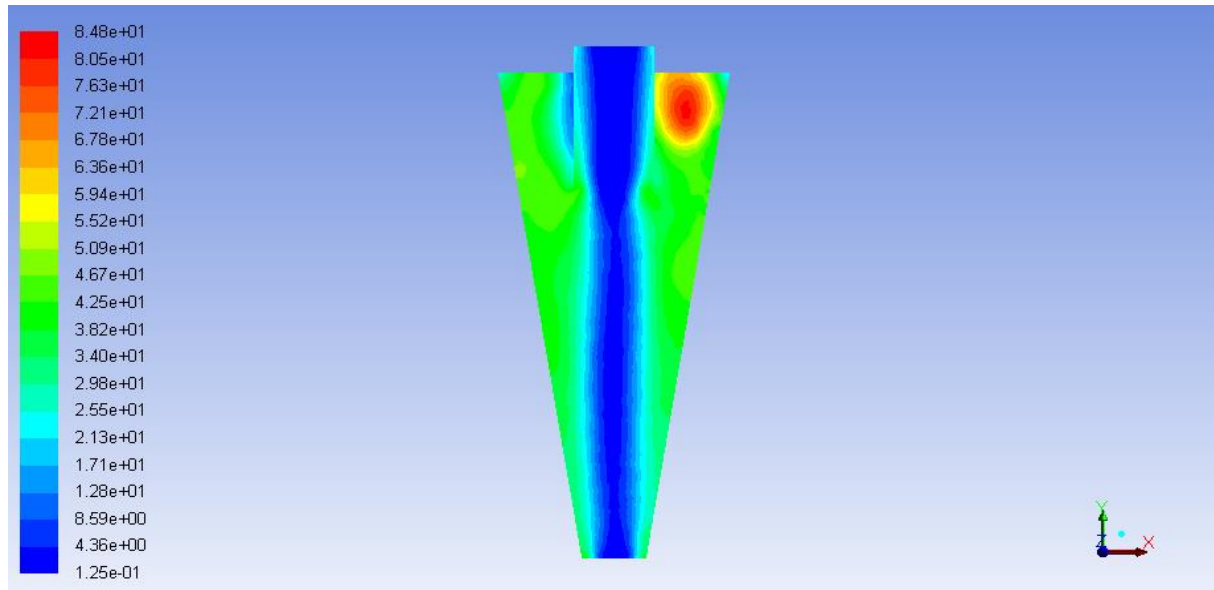
(ب)



(الف)

شکل ۵- کانتور فشار استاتیکی برای سیکلون در سرعت‌های مختلف





شکل ۶- کانتور فشار دینامیکی برای سیکلون

#### بازده جداسازی

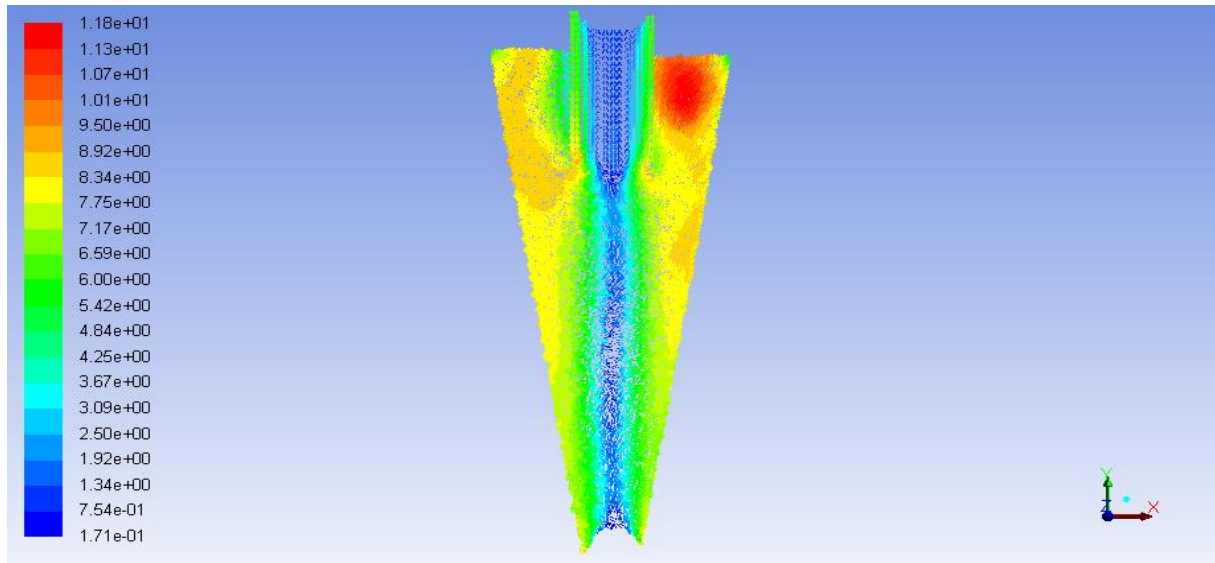
بازده جداسازی به عنوان عامل مهمی در عملکرد سیکلون در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که قابل مشاهده است، بازده جداسازی ۹۴/۱ درصد برای جداسازی سیکلون طبق رابطه ۲ بدست آمد (جدول ۳).

جدول ۳- بازده جداسازی

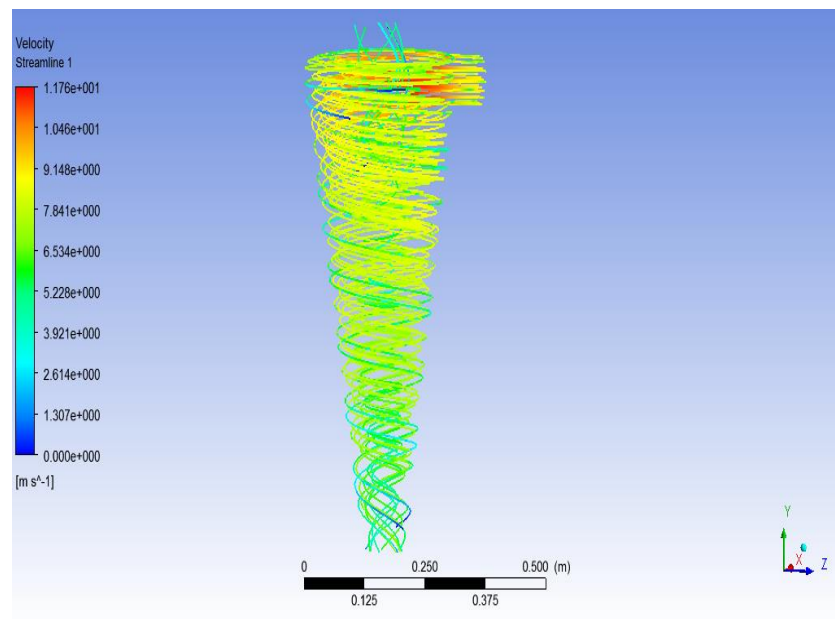
سیستم	بازده جداسازی (%)
سیکلون جداکننده	۹۴/۱

#### اندازه سرعت

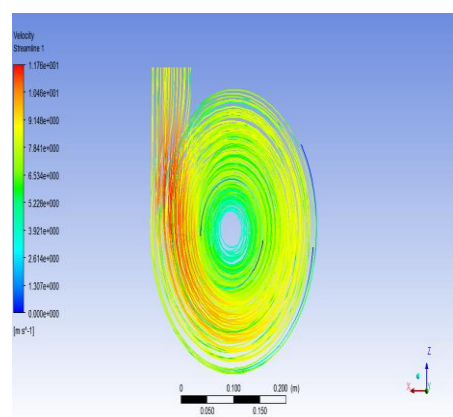
اندازه سرعت به واسطه تاثیر مستقیم سرعت بر عملکرد سیکلون شامل افت فشار و بازده عملکردی آن در مطالعه یک سیکلون حائز اهمیت است. چنانکه در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، وکتور اندازه سرعت برای سیکلون در شرایط کاری ارائه شده است. دلیل ارائه وکتور برای اندازه سرعت، جهت دار بودن آن است، چرا که سرعت به واسطه اینکه یک پارامتر برداری است، بدون جهت و صرفاً با در نظر گرفتن مقدار فاقد اعتبار است. وکتور اندازه سرعت برای بخش داخل سیکلون شامل ۳ منطقه اصلی است. منطقه ۱ بخش ورودی جریان است که وارد سیکلون می‌گردد و به واسطه سرعت بالا، مقدار اندازه سرعت نیز در این بخش مقدار بالایی را به خود اختصاص داده است. منطقه دوم بخش های زد و نارنجی رنگی است که به هنگام جریان چرخشی مقادیر نسبتاً بالای اندازه سرعت را ارائه می‌کنند و از حیث مقدار در رده دوم قرار دارند. مناطق سبز رنگ نزدیک به بخش مرکزی سیکلون نیز منطقه سوم را شامل می‌گردد که در این مناطق جریان های بازگشتی شدید در داخل سیکلون ایجاد شده است و در آخر منطقه ۴ بخش مرکزی سیکلون در راستای ارتفاع آن را شامل می‌گردد که از نظر اندازه سرعت مقدار پایین تری نسبت به سه منطقه ذکر شده دارند.



شکل ۷- بردار اندازه سرعت



(الف)

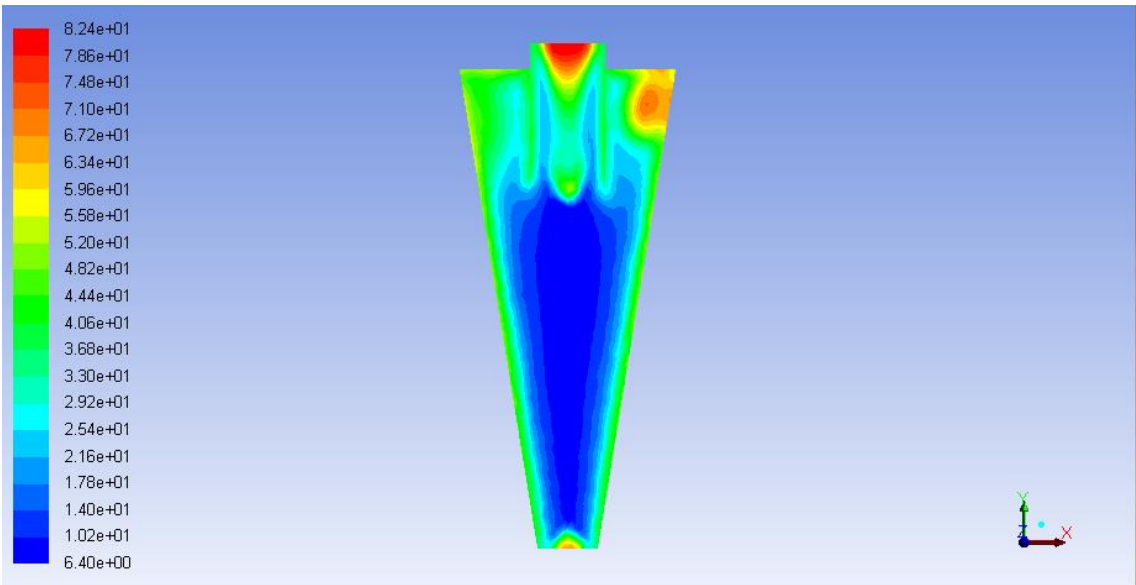


(ب)

شکل ۸- الف) مسیر حرکت در داخل سیکلون در حالت پایه- دید از روبرو؛ ب) مسیر حرکت در داخل سیکلون در حالت پایه- دید از بالا

### شدت آشفته‌گی

به دلیل اینکه افزایش شدت آشفته‌گی در گردابه بیرونی بازده جداسازی را کاهش می‌دهد، از این رو بایستی این پارامتر در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد. با مراجعه به شکل ۹ می‌توان دریافت که بیشترین مقدار شدت آشفته‌گی به بخش خروجی گاز در انتهای خروجی بالایی سیکلون و همچنین بخش ورودی سیکلون است، که در هر دو مورد دلیل افزایش شدت آشفته‌گی را می‌توان نوسانات بالای سرعت در این مناطق دانست. در بخش مرکزی سیکلون به واسطه اینکه سرعت تغییرات کمی دارد و نوسانات سرعت نسبتاً پایین است، مقادیر پایین شدت آشفته‌گی برای این مناطق بدست آمده است.

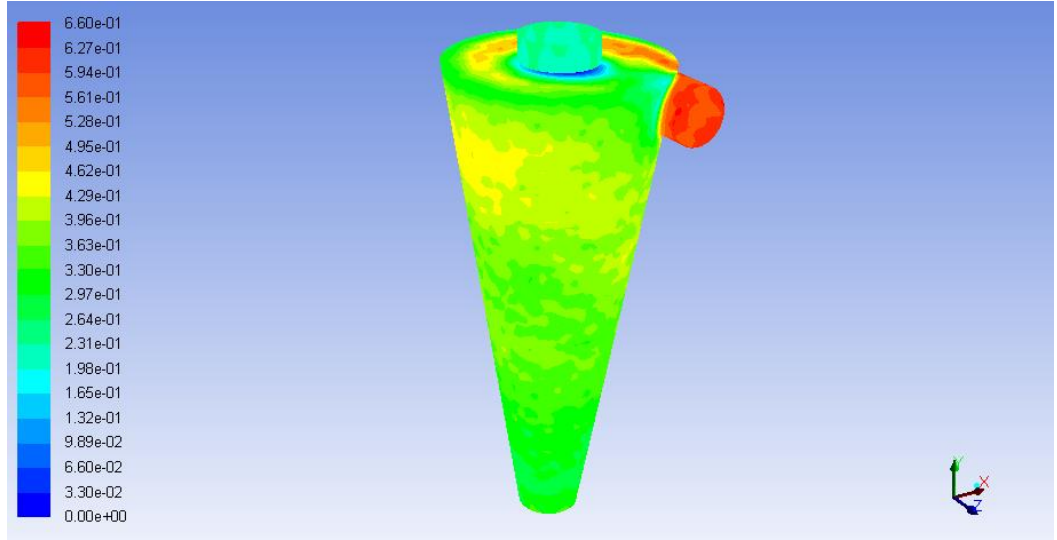


شکل ۹- کانتور شدت آشفته‌گی برای سیکلون در حالت پایه

### سایش دیواره سیکلون

سایش به عنوان یک عامل مهم، عملکرد یک سیکلون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تحت تاثیر سایش و به مرور زمان درزها و رخنه‌هایی در بدنه سیکلون به وجود آمده و یکپارچگی ساختار هندسی سیکلون از بین خواهد رفت. در نتیجه جریان از این بخش‌ها به بیرون نفوذ کرده و مشکلات زیادی را به وجود می‌آید. از این رو جریان سیال بر روی سایش در بدنه سیکلون بایستی به دقت مورد مطالعه قرار گیرد.

در شکل ۱۰ کانتور سه بعدی سایش دیواره برای سیکلون ارائه شده است. بیشترین مناطق در معرض سایش علاوه بر ورودی جریان که بالاترین نرخ برخورد و در نتیجه بیشترین مقدار اصطکاک ایجاد شده را دارد، بخش‌های مرتبط با دیواره است که جریان در داخل سیکلون بر روی گردابه‌های ایجاد شده در آن مسیر حرکت می‌کند.



شکل ۱۰- کانتور سایش دیواره

### نتیجه‌گیری



در این مطالعه یک سیکلون پر کاربرد در صنعت آرد مورد به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است. مواردی شامل میدان فشار از نظر افت فشار، اندازه سرعت، بازده جداسازی، خط جریان، شدت آشفتگی و سایش دیواره ارائه شده است. همچنین به دلیل اهمیت کانتور فشار برای پی بردن به شبیه‌سازی صحیح، نمودار دو بعدی شامل افت فشار به ازای موقعیت برش داده شده با جزئیات کامل ارائه شده است.

اعتبارسنجی برای مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان دهنده توانایی بالای دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده کشاورزی و صنعتی شده است. علاوه بر استخراج منحنی اعتبارسنجی، تست استقلال از شبکه به منظور بررسی کیفیت صحیح شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای حل معادلات از حل‌تر بر مبنای فشار استفاده کردید.

نتایج نشان داد که مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز توانایی بالایی برای شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی مانند جریان مواد در داخل سیکلون‌ها را دارا است. همچنین خطوط جریان داخل سیکلون و جدا شدن فازها از بخش‌های بالا (فاز هوا) و بخش پایینی (فاز جامد) به خوبی توسط این مدل نمایش داده شد.

همچنین نتیجه گرفته شد که به شرط رقیق بودن جریان (نسبت حجمی فاز جامد به فاز هوا زیر ۱۲٪) مدل لاگرانژی فاز گسسته (DPM) توانایی بالایی را برای نشان دادن فعل و انفعالات فازهای گاز و جامد دارا می‌باشد.

## مراجع

- 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.
- Lozia, D. L, and Leith, D. 1989. Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency, Aerosol Science and Technology, 10 (3), 491-500
- Kim, J.C., and Lee, K.W. 1990. Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones, Aerosol Science and Technology, 12 (4). 1003-1015.
- Lim, K.S., Kim, H.S., and Lee, K.W. 2004. Characteristics of the Collection Efficiency for a Cyclone with Different Vortex Finder Shapes, Journal of Aerosol Science, 35 (6), 743-54.
- 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 .
- Gimbun. J., Chuah, T.G., Choong, T.S.Y., Fakhrul-nazi, A. 2005. Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance, Journal of Aerosol Science, 36 (8), 1056-1065 .
- Wang, B., Xu, D.L., Chu, K. W., Yu, A.B. 2006. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator, Applied Mathematical Modelling, 30: 1326-1342.
- رضوانی و ندفنائی. ع.، محمد نیکبخت. ع.، مدرس مطلق. ا. ۱۳۹۲. مدل سازی انتقال مواد در جدا کننده‌های سیکلونی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. ششمین همایش‌های پژوهشی کشاورزی - دانشگاه کردستان، ۱۸۲-۱۸۵
- 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 .
- Brar, L. S., Sharma, R. P and Dwivedi, R. 2015. Effect of Vortex Finder Diameter on Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators. Particulate Science and Technology, 33 (1), 34-40.



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. Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X., and Wang, B. 2017. The Effect of Cross-Shaped Vortex Finder on the Performance of Cyclone Separator. *Powder Technology*, 313 (May), 135-44.
14. 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.
15. ANSYS FLUENT Theory Guide. 2013. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 18.2 15317, 373-464.



## Performance evaluation of a separating cyclone in flour processing

Ehsan Aghayi Badalbou<sup>1</sup>, Vahid Rostampour<sup>2\*</sup>, Adel Rezvanivand Fanaei<sup>3</sup> and, Ali M. Nikbakht<sup>4</sup>

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

### Abstract

In this study, a type of cyclone separator used in flour industry has been studied experimentally and numerically. The Reynolds stress turbulence model (RSM) is used to simulate flow turbulence and the pressure-based type solver to solve the equations. The cyclone operational properties including pressure drop and separation efficiency have been investigated. In addition to the above mentioned parameters, velocity vectors, turbulent intensity and wall erosion contours for the studied cyclone were also extracted. The results show that computational fluid dynamics can well simulate the flow within the cyclone used in the flour industry and extract useful information.

**Key words:** ANSYS Fluent; Pressure Drop; Separation efficiency; Computational Fluid Dynamics; Reynolds Stress Model

\*Corresponding author

E-mail: V.rostampour@urmia.ac.ir