



## شبیه‌سازی عددی عملکرد سایکلون گاز - جامد در دماهای بالا

معین سیادت، سعید خردمند\*

دانشکده مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲۵ شهریور ۱۳۹۵  
پذیرش: ۷ آذر ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۹ آذر ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

سایکلون استیرماند  
دینامیک سیالات محاسباتی  
دما  
افت فشار  
راندمان جمع‌آوری ذرات جامد

**چکیده:** برخلاف هندسه ساده سایکلون‌ها، جریان درون آن‌ها بسیار پیچیده است. یکی از عواملی که این پیچیدگی را چند برابر می‌کند، تغییر در افت فشار جریان و راندمان جمع‌آوری ذرات جامد بر اثر تغییر دمای کاری آن است. دمای سیال یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار جریان است. تغییر دمای سیال موجب تغییر خواص ترموفیزیکی و در نتیجه تغییر در الگوهای جریانی آن می‌شود. در این مقاله، اثر دمای سیال ورودی بر دو مشخصه عملکردی مهم سایکلون استیرماند راندمان بالا، افت فشار و راندمان جداسازی، با استفاده از اصول دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان دوفازی درون سایکلون با رویکرد اولیری - لاگرانژی مدل‌سازی شد. شبیه‌سازی در محدوده دمایی ۷۰۰-۲۹۳ کلوین و در چهار سرعت ورودی مختلف با استفاده از روش حجم محدود به کمک مدل تلاطمی تنش رینولدز در شرایط ناپایا انجام شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما، میزان چرخش ذرات و جریان در بدنه سایکلون کاهش یافته و در نتیجه، راندمان و افت فشار کاهش می‌یابند. به ازای هر ۱۰۰ کلوین افزایش دما، بین ۱۴٪ تا ۱۶٪ کاهش افت فشار در دبی‌های مختلف مشاهده می‌شود. همچنین راندمان جمع‌آوری ذرات هم بین بیشینه و کمینه دما، حداکثر ۴/۶۴٪ کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

سایکلون‌ها یکی از محبوب‌ترین و کارآمدترین وسایل مورد استفاده در صنعت جهت جداسازی ذرات جامد از جریان سیال هستند. در این وسیله، از اختلاف اینرسی بین فاز گازی و جامد جهت جدا کردن این دو از یکدیگر استفاده می‌شود. راندمان جداسازی بالا، عدم نیاز به منبع انرژی، عدم نیاز به بازدیدهای دوره‌ای، نداشتن قطعه متحرک و نیاز به روغن کاری از مزایای استفاده از سایکلون‌ها است.

امروزه سایکلون‌ها به شکل گسترده‌ای در واحدهای صنعتی، برخی از سیستم‌های تهویه مطبوع، پالایشگاه‌ها و ایستگاه‌های گاز شهری به‌عنوان پیش‌فیلتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین دلیل، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. ژو و لی [۱]، افت فشار و قطر برش<sup>۱</sup> هفت سایکلون با قطر یکسان و طول‌های متفاوت در قسمت مخروطی و گردابه‌یاب را بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد در صورتیکه اختلاف ارتفاع استوانه و گردابه‌یاب برابر با قطر سایکلون باشد، افت فشار و قطر برش کمینه می‌شوند. همچنین با افزایش دو برابری دبی ورودی، کاهش ۸۰٪ در قطر برش مشاهده می‌شود. لیم و همکارانش [۲] اثر شکل گردابه‌یاب (مخروطی و استوانه‌ای) را روی راندمان سایکلون مورد آزمایش قرار دادند. ارتفاع و زاویه رأس مخروط چندین بار تغییر کرد تا اثر آنها روی راندمان جداسازی

ذرات مشخص شود. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر هر دو پارامتر فوق، تغییر فراوانی در افت فشار و راندمان سایکلون به وجود می‌آید. دیرگو و لیث [۳] سایکلون استیرماند<sup>۲</sup> راندمان بالا با قطر ۰/۳۰۵ متر را در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار دادند و توانستند یک رابطه تجربی برای افت فشار سایکلون ارائه کنند. امروزه استفاده از روش‌های عددی برای تحلیل جریان سیال گسترده‌تری فراوانی پیدا کرده است، اگرچه استفاده از این روشها نیاز به داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی دارد، اما در بسیاری از موارد می‌تواند جایگزین آن‌ها شود. بررسی عددی چندین سایکلون با ابعاد یکسان و قطر مخروط متفاوت توسط جولیوس گیمبون و همکاران [۴] انجام شد. بنا بر نتایج به دست آمده، کاهش قطر نوک مخروط افزایش هم‌زمان افت فشار و راندمان جداسازی را به دنبال دارد. الساید و لاکور [۵] توانستند با استفاده از روش نلدر - مید<sup>۳</sup>، ابعاد بهینه سایکلون استیرماند برای کمینه‌سازی افت فشار را به دست بیاورند. سایکلون بهینه‌شده ۵۹٪ کاهش در افت فشار نسبت به سایکلون استیرماند دارد. در سایکلون بهینه‌شده، میزان سرعت مماسی در گردابه خارجی کاهش یافته و در نتیجه راندمان سایکلون کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که این دو پارامتر (راندمان و افت فشار) رفتاری در جهت عکس یکدیگر دارند و باید از بهینه‌سازی چند هدفه استفاده کرد. استفاده از شبکه‌های عصبی برای تخمین افت فشار و قطر برش سایکلون

1 Cut size

2 Stairmand

3 Nelder - Mead

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeid\_kheradmand@yahoo.com

ورودی دارد، به طوری که به ازای ۲۵٪ کاهش در سرعت ورودی، افت فشار و راندمان جداسازی به ترتیب ۴۶٪ و ۳۱٪ کاهش پیدا می‌کند. یکی از مسائلی که خطوط لوله و تجهیزات ایستگاه‌های گاز شهری را تهدید می‌کند، وجود ذرات جامد در خطوط انتقال است. محبی و همکاران [۱۳] سایکلونی برای یک ایستگاه گاز طراحی کردند تا با قرار گرفتن قبل از سیستم فیلتراسیون موجود در ایستگاه، موجب کاهش بار روی فیلترها شود. با توجه به فضای موجود برای قرارگیری سایکلون، ابتدا سایکلون استیرماند راندمان بالا با قطر مناسب انتخاب شد. سپس به منظور افزایش بازده جداسازی و جلوگیری از خروج ذرات از گردابه‌یاب، طول این قسمت با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد. سایکلون طراحی شده دارای راندمان ۹۶٪ هست. برای تحلیل عددی جریان سایکلون از روش حجم محدود و مدل تنش رینولدز استفاده شده است. علاوه بر طول گردابه‌یاب، طول قسمت مخروطی و استوانه‌ای سایکلون هم تأثیر فراوانی روی افت فشار و راندمان آن دارد. لاکسیر سینگ و همکاران [۱۴] نشان دادند که افزایش طول قسمت استوانه‌ای سایکلون تا ۵/۵ برابر قطر بدنه آن، ۹۵٪ افزایش راندمان و ۳۴٪ کاهش افت فشار را در پی دارد. ضمن اینکه افزایش طول بخش مخروطی شکل انتهایی سایکلون تا ۶/۵ برابر قطر بدنه، موجب کاهش ۲۹٪ افت فشار و افزایش ۱۱٪ راندمان می‌شود. میسیولا و همکاران [۱۵] به کمک روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۴</sup> نشان دادند که با افزایش زاویه ورودی در ورودی‌های ماریچی، کاهش فراوانی درافت فشار و راندمان سایکلون به وجود می‌آید. وو و همکاران [۱۶] اثر سرعت و مساحت ورودی و همچنین قطر نوک مخروط را روی آنتروپی تولیدی و تلفات انرژی سایکلون بررسی کردند. شبیه‌سازی عددی با مدل تنش رینولدز و تحت شرایط ناپایا انجام شده است. ضمن اینکه دیواره‌های سایکلون عایق فرض شده‌اند، بنابراین از تولید آنتروپی و تلفات انرژی ناشی از انتقال حرارت صرف نظر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تلفات انرژی در سایکلون رابطه مستقیم با سرعت ورودی و معکوس با قطر گردابه‌یاب دارد. همچنین در ورودی گردابه‌یاب و انتهای سایکلون بیشترین میزان انرژی جریان ورودی مصرف می‌شود. علاوه بر تغییر ابعاد بخش‌های مختلف سایکلون، با تغییر شکل ورودی نیز می‌توان به عملکرد مطلوب‌تری رسید. ژائو و همکاران [۱۷] نشان دادند که اضافه کردن ورودی دوم به سایکلون، باعث کاهش قطر برش می‌شود. آن‌ها سه سایکلون با ابعاد یکسان، یکی با یک ورودی و دو سایکلون دیگر با دو ورودی، یکی با دو ورودی ماریچی و دیگری با دو ورودی ساده را در دبی‌های مختلف آزمایش کردند و نشان دادند که در این دو سایکلون، قطر برش به ترتیب کاهش ۱۲/۵٪ و ۸/۳۳٪ در کمترین دبی و ۳۰/۷۷٪ و ۸/۳۴٪ در بیشترین دبی دارد، بدون اینکه افزایش فراوانی درافت فشار به وجود بیاید. این نتایج نشان از بهبود فراوان در جداسازی ذرات با اضافه کردن ورودی دوم، خصوصاً به شکل ماریچی، به سایکلون دارد. علاوه بر سایکلون‌های دایره‌ای، سایکلون‌های مربعی هم کاربردهای فراوانی

می‌تواند جایگزین روش‌های عددی شود، با این تفاوت که به هزینه و زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد. الساید و لاکور [۶] نشان دادند که شبکه‌های عصبی شعاعی<sup>۱</sup>، دقیق‌ترین پیش‌بینی از دو پارامتر فوق را ارائه می‌دهند و بیشترین تطبیق را با داده‌های تجربی دارند. علاوه بر سایکلون‌های مماسی، سایکلون‌های محوری هم در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع از سایکلون‌ها، برای ایجاد چرخش در جریان، از پره‌های راهنما استفاده می‌شود. جونگ و همکاران [۷] اثر تغییر زاویه این پره‌ها روی عملکرد سایکلون را بررسی کردند. بیشترین راندمان جداسازی در زاویه ۳۰° به دست آمد، ضمن اینکه کاهش زاویه پره موجب افزایش افت فشار می‌شود. صفی‌خانی و همکاران [۸] بهینه‌سازی ابعادی یک سایکلون خاص برای کمینه کردن افت فشار و قطر برش را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند. آن‌ها ۸۱ سایکلون با ابعاد متفاوت را به روش عددی بررسی کرده و سپس دو چند جمله‌ای درجه دوم برای محاسبه افت فشار و قطر برش به دست آوردند. الساید و لاکور [۹] بهینه‌سازی ابعادی سایکلون استیرماند را برای کمینه‌سازی افت فشار و قطر برش با استفاده از الگوریتم ژنتیک و متدولوژی سطح پاسخ<sup>۲</sup> انجام دادند. تحلیل متدولوژی سطح پاسخ نشان می‌دهد در صورتی که قطر بدنه سایکلون ثابت باشد، نسبت قطر گردابه‌یاب به قطر بدنه بیشترین تأثیر را روی عدد اولر (افت فشار بی‌بعد) دارد و بعد از آن طول و عرض ورودی و سپس ارتفاع مخروط بیشترین اثر را دارند. این ۴ عامل، به همین ترتیب هم روی قطر برش اثر دارند، با این تفاوت که تغییر ارتفاع مخروط، قطر برش را بیشتر از افت فشار تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سایکلون بهینه‌شده افت فشار و قطر برش به ترتیب ۵۷/۷٪ و ۱۰/۲۸٪ نسبت به سایکلون استیرماند کاهش یافته است. آزادی و همکاران [۱۰] اثر اندازه سایکلون را برافت فشار و راندمان آن بررسی کردند. آن‌ها سه سایکلون با ابعاد متفاوت را با دو مدل تنش رینولدز و کی-پسیلون<sup>۳</sup> بررسی کردند. نتایج حاصل از حل عددی نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سایکلون، افت فشار و قطر برش افزایش می‌یابند. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده از دو مدل نشان می‌دهد که جریان داخل سایکلون به دلیل چرخش زیاد، به شدت ناهمسانگرد بوده و استفاده از مدل‌های همسانگرد موجب تولید نتایجی با اختلاف بالا با داده‌های تجربی، بخصوص در مورد راندمان کل می‌شود.

یکی از راه‌های افزایش راندمان سایکلون مماسی، ایجاد کانال‌هایی در بدنه سایکلون است، به طوری که میزان چرخش جریان در بدنه افزایش یابد. در این صورت نیروی گریز از مرکز بزرگتری به ذرات وارد می‌شود و احتمال جدا شدن ذرات ریز از جریان افزایش می‌یابد. الکساندراس و پاراناس [۱۱]، جریان دوفازی در یک سایکلون با ۶ کانال در بدنه آن را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحلیل قرار دادند. بر طبق نتایج به دست آمده، با استفاده از این روش راندمان سایکلون تا ۹۹/۳٪ افزایش می‌یابد. پی فانک و همکاران [۱۲] نشان دادند که افت فشار سایکلون وابستگی زیادی به سرعت

- 1 Radial Basis Functions Neural Networks
- 2 Response Surface Methodology
- 3 RNG  $k - \epsilon$

خاکسار و همکاران [۲۶] اثر هندسه کانال خروجی بر عملکرد سایکلون را به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که راندمان جداسازی با زاویه خروجی گاز تمیز نسبت عکس و با طول خروجی نسبت مستقیم دارد. خدانی [۲۷] مطالعه‌ای بر روی امکان استفاده از سایکلون در جداسازی ذرات جامد از خط لوله گاز طبیعی انجام داد. تجمع این مواد در درون خطوط لوله سبب کاهش راندمان انتقال گاز شده و می‌تواند در نقاط انتهایی خطوط سبب بروز گرفتگی و تخریب فیلترها شوند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سایکلون‌ها می‌توانند به‌عنوان یک گزینه مناسب برای فیلتر مرحله اول جهت جداسازی ذرات در ایستگاه‌های تقویت فشار مورد استفاده قرار بگیرند. فرزانه‌گرد و آل‌نبی [۲۸]، از روابط تئوری برای طراحی سایکلون جهت جداسازی ذرات دوده از گاز طبیعی استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از ۴ سایکلون با آرایش موازی بهترین راندمان جداسازی را به دنبال دارد. سپس با استفاده از تحلیل عددی، افت فشار و قطر برش سایکلون در دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شفیی و همکاران [۲۹]، مطالعه‌ای بر روی تأثیر پارامترهای عملیاتی و طراحی در طبقه‌بندی پودر با استفاده از سایکلون و مخزن ته‌نشینی انجام دادند. به این ترتیب که مواد پس از ورود به لوله وارد مخزن ته‌نشینی وزنی می‌شوند. در این مخزن با توجه به نوع طراحی آن، مواد درشتتر از ۷۴ میکرومتر جدا شده و مواد ریزتر وارد سایکلون شده و در آن از هوا جدا می‌شوند. فرزاتگان و میرزایی [۳۰]، بهینه‌سازی تک‌هدفه مدار آسیای گلوله‌ای مجتمع فسفات اسفوردی را بر پایه الگوریتم ژنتیک انجام دادند. پس از بررسی کارخانه فسفات اسفوردی، مشخص شده بود که مشکل عمده موجود در مدار، ذرات نرمه با عیار بالای آهن در ته ریز هیدرو سایکلون در مدار خردایش است؛ بنابراین، هدف از بهینه‌سازی مدار خردایش، بهبود خردایش در آسیای گلوله‌ای و نیز افزایش بازدهی جدایش در هیدرو سایکلون قرار گرفت.

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی مانند تولید برخی مواد شیمیایی، تصفیه گاز خروجی از دودکش کارخانه‌ها و همچنین برخی از فرآیندهای مورد استفاده در نیروگاه‌های حرارتی لازم است تا ذرات جامد از جریان گازی با دمای بالا خارج شوند. با توجه به تغییر خواص فاز گازی با دما، عملکرد سایکلون وابسته به دمای سیال عامل است. در مطالعات گذشته، تنها اثر دما روی افت فشار مشخص شده بود [۲۱]؛ اما در مطالعه حاضر، علاوه بر افت فشار، اثر تغییر دما بر راندمان جمع‌آوری ذرات در یک محدوده دمایی وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است. به علاوه، تغییر در پروفیل‌های سرعت در هر دو بخش گردابه سایکلون (آزاد و اجباری) مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی جریان دوفازی از دیدگاه اویلری-لاگرانژی استفاده شده است. در این دیدگاه، فاز گازی به‌عنوان فاز پیوسته و ذرات جامد به‌عنوان فاز گسسته در نظر گرفته می‌شوند [۳۱]. در صورتی که کسر حجمی ذرات (نسبت حجم کل ذرات به حجم سیال) کم باشد، حتی اگر دبی جرمی ذرات بیشتر

در صنعت دارند. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی صفی‌خانی و همکاران [۱۸] در این سایکلون‌ها به دلیل وجود گوشه‌های تیز، گردابه ضعیف‌تری تشکیل می‌شود و در نتیجه، نسبت به سایکلون دایره‌ای هم‌اندازه خود، افت فشار و راندمان کمتری دارد. سو و همکاران [۱۹] اثر شکل و زاویه ورودی دوم روی عملکرد سایکلون‌های مربعی را بررسی کردند. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از دو ورودی با زاویه  $45^\circ$  نسبت به بدنه سایکلون، کمترین افت فشار مشاهده می‌شود. در صورتی که راندمان آن با حالتی که این زاویه صفر باشد برابر است. ضمن اینکه استفاده از یک ورودی ساده بالاترین راندمان و افت فشار را به دنبال دارد. این نتایج در نقطه مقابل نتایجی است که ژائو و همکاران [۱۷] برای سایکلون‌های دایره‌ای به دست آوردند. کاراگوز و کایا [۲۰] انتقال حرارت از دیواره‌های یک سایکلون را تحت شرایط پایا بررسی کردند. با افزایش سرعت ورودی، انتقال حرارت از همه سطوح سایکلون افزایش می‌یابد، در حالی که با نزدیک شدن به انتهای سایکلون، عدد ناسلت و در نتیجه میزان انتقال حرارت در حال کاهش است. نتایج فوق با شرط دما ثابت روی دیواره‌ها گرفته شده است، در حالی که این شرط نمی‌تواند برای دیواره‌های سایکلون واقعیت داشته باشد. جولیوس و همکاران [۲۱] اثر دما و سرعت ورودی را روی افت فشار جریان تک فاز یک سایکلون بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش دما، افت فشار سایکلون کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که رابطه محاسبه افت فشار، پیشنهاد شده توسط شفرد و لاپل [۲۲]، بیشترین تطبیق را با نتایج حاصل از حل عددی در دماهای مختلف دارد. سانگ و همکاران [۲۳] با شبیه‌سازی عددی حرکت ذرات در یک سایکلون، بزرگی نیروهای وارد بر ذرات را مشخص کردند. همان‌طور که در مطالعات محققان پیشین نیز تأکید شده بود، نیروهای درگ و گریز از مرکز، نیروهای غالب وارد بر ذرات در حال چرخش در سایکلون هستند. درگ ذرات را به سمت مرکز گردابه و گریز از مرکز آن‌ها را به سمت دیواره‌های جانبی می‌کشاند. در حالی که بزرگی نیروهای ناشی از گرادیان فشار و لیفت، ۳ و ۱۵ برابر کمتر از نیروی درگ است. نوواکوفسکی و الاحمدی [۲۴] یک مدل تلاطمی انتقال تنش برشی جدید بر مبنای مدل‌های ادی-ویسکوزیتی برای جریان‌های چرخشی ارائه کردند و نتایج حاصل از حل عددی جریان درون سایکلون با این روش را با نتایج حاصل از روش تنش رینولدز و نتایج تجربی مقایسه کردند. در این مدل از عدد ریچاردسون برای وارد کردن اثرات چرخش و انحنای جریان استفاده شده است. مدل پیشنهادی نسبت به مدل تنش رینولدز دارای دقت مناسبی است، در حالی که هزینه محاسباتی بسیار کمتری را می‌طلبد. مسیحی و شریف‌آباد [۲۵]، عملکرد یک سایکلون گاز-جامد را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. آنها از دو مدل آشفتگی کی-اِپسیلون و تنش رینولدز برای حل معادلات آشفتگی و از الگوریتم سیمپل جهت کوپلینگ بین فشار و سرعت استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل تنش رینولدز نزدیکی زیادی به داده‌های تجربی دارد. همچنین مقایسه بین چند سایکلون با قطر متفاوت نشان می‌دهد که سایکلون با قطر ۲۰۵ میلی‌متر کمترین افت فشار و بیشترین راندمان را دارد.

که  $v_p^2/r$  و  $u_p v_p/r$  مقادیر شتاب‌گیر از مرکز و کوریولیس ذره،  $g$  شتاب جاذبه و  $w$ ،  $v$ ،  $u$  مؤلفه‌های سرعت هستند. جمله اول سمت راست معادلات فوق نیروی پسا بر واحد جرم ذره است و مقدار  $F_D$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \quad (5)$$

برای محاسبه ضریب پسای ذره از رابطه الکساندر و مرسی [۳۲] استفاده شده است:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (6)$$

ثوابت  $a_1$ ،  $a_2$ ،  $a_3$  برحسب  $Re_p$  تغییر می‌کنند. در مطالعه حاضر، فرض شده است که دمای محیط ۲۹۳ کلوین باشد، بنابراین در این دما سیال با محیط پیرامون انتقال حرارتی ندارد. در صورتی که دمای سیال ورودی بالاتر از ۲۹۳ کلوین باشد، برای واردکردن اثر گرادیان دمای سیال روی مسیر حرکت ذرات، نیروی ترموفورتیک که خلاف جهت گرادیان دما به ذرات وارد می‌شود، در سه جهت وارد معادلات (۲) تا (۴) می‌شوند و از رابطه زیر به دست می‌آیند [۳۳]:

$$F = -D_{T,p} \frac{1}{Tm_p} \nabla T \quad (7)$$

مسیر حرکت ذرات (مخصوصاً ذرات ریز) وابستگی زیادی به نوسانات لحظه‌ای سرعت سیال دارد. این نوسانات، توابع تصادفی از زمان و مکان هستند. برای واردکردن اثر ادی‌های جریان بر مسیر حرکت ذره از روش DRW<sup>۱</sup> استفاده شده است.

شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی درون سایکلون با دیدگاه اوپلری-لاگرانژی از روش حجم محدود فشار مبنا برای حل معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم و معادلات تلاطم و با استفاده از روش مرتبه دوم بالادست برای گسسته‌سازی جملات معادلات فوق انجام شد. برای کوپلینگ بین فشار و سرعت هم از الگوریتم سیمپل استفاده شد.

جدول ۱: ابعاد سایکلون شبیه‌سازی شده (قطر سایکلون ۳۰۰ میلی‌متر)

Table 1. Stairmand ratios ( $D=300$  mm)

$a/D$	$b/D$	$Bc/D$	$S/D$	$h/D$	$D_x/D$	$H_t/D$
۰/۵	۰/۲	۰/۳۷۵	۰/۵	۱/۵	۰/۵	۴

۲-۳- شرایط مرزی

جریان سیال هوا با سرعت یکنواخت و ثابت وارد سایکلون می‌شود و شدت تلاطم آن از رابطه  $I=0.16Re_{DH}^{-1/8}$  محاسبه می‌شود و  $D_H=4A/P=4ab/2(a+b)$  قطر هیدرولیکی کانال ورودی است که  $a$  و  $b$  ارتفاع و عرض کانال ورودی است (شکل ۱) [۱۶]. برای دیواره‌ها شرط عدم لغزش فرض شده است، ضمن اینکه دیواره‌های سایکلون با محیط

از دبی جرمی سیال باشد، می‌توان اثر اصطکاک بین ذرات را نادیده گرفت (کوپلینگ یک‌راهه) و فرض کرد که ذرات بر روی جریان تأثیری ندارند [۸]. در مطالعه حاضر، کسر حجمی ذرات کمتر از ۳٪ است، بنابراین با اطمینان می‌توان از اصطکاک بین ذرات صرف‌نظر کرد [۴].

۲-۱- فاز پیوسته

برای محاسبه میدان فشار، سرعت و دما معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در حالت ناپایا برای جریان مغشوش روی شبکه با سازمان حل می‌شوند. برای محاسبه مقادیر اغتشاشی هم از روش تنش رینولدز استفاده می‌شود [۱۰].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i u_j}) = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \phi_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

جملات سمت راست معادله فوق به ترتیب دیفیوژن تلاطمی، دیفیوژن مولکولی، تولید تنش، کرنش فشاری و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی تلاطمی را نشان می‌دهند [۳۱].

۲-۲- فاز گسسته

بعد از همگرا شدن معادلات جریان، ذرات جامد به میدان جریان محاسبه شده تزریق می‌شوند. با توجه به محدوده قطر ذرات، ۱ تا ۷ میکرومتر، نیروی پسا نیروی غالب وارد بر ذرات است [۵]. برای محاسبه سرعت هر ذره در سه جهت  $x$  و  $y$  و  $z$  (شکل ۱) از روابط زیر استفاده می‌شود [۱۳ و ۱۰]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{v_p^2}{r} \quad (2)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = F_D(v - v_p) - \frac{u_p v_p}{r} \quad (3)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = F_D(w - w_p) - g \quad (4)$$

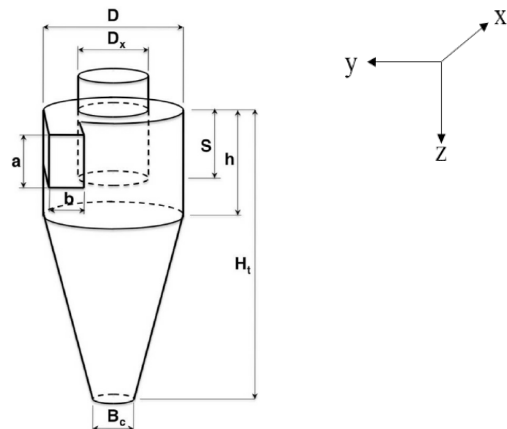


Fig. 1. Schematic of cyclone

شکل ۱: شماتیک سایکلون

با دمای ۲۹۳ کلوین و ضریب انتقال حرارت جابجایی ۳ وات بر مترمربع کلوین تبادل حرارت می‌کنند. برای مرز خروجی هم برای جلوگیری از ایجاد جریان بازگشتی شرط جریان خروجی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است [۸]. ژائو و همکاران [۳۵] شبیه‌سازی عددی سایکلون استفاده شده در این مقاله را با تزریق ۴۰۰۰ ذره انجام دادند. در مطالعه حاضر، برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به تعداد ذرات، ۴۲۰۰ ذره با سرعت ورودی صفر و هم‌دما با سیال ورودی وارد جریان شدند. همه دیواره‌های سایکلون (به جز کف آن) کاملاً الاستیک هستند و ضریب ارتجاع<sup>۲</sup> برابر یک در نظر گرفته شده است [۱۸]. به عبارت دیگر ذرات بعد از برخورد با دیواره، با همان سرعت و زاویه برخورد نسبت به خط عمود بر دیواره، برگردانده می‌شوند. اما اگر ذره‌ای به کف سایکلون برخورد کند به دام می‌افتد. خواص ذره جامد با دما ثابت در نظر گرفته شده است، در صورتی که خواص فاز گازی (هوا) با دما تغییر می‌کند که در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج

شبیه‌سازی عددی در چهار دبی متفاوت انجام شد. محدوده دمایی مورد مطالعه هم در ۶ دمای متفاوت جریان ورودی، بین ۲۹۳ تا ۷۰۰ کلوین، است. نتایج به دست آمده از حل عددی شامل پروفیل سرعت مماسی سیال (عامل اصلی جمع‌آوری ذرات جامد) و همچنین راندمان و میدان دما و فشار سایکلون است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، با افزایش دبی سیال راندمان جداسازی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افت فشار جریان هم بیشتر می‌شود. در ادامه، اثر افزایش دما روی پارامترهای مختلف مشخص شده است:

#### ۳-۱- میدان سرعت

شکل ۳ پروفیل سرعت مماسی بی‌بعد را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. با افزایش دما، به دلیل افزایش ویسکوزیته دینامیک و کاهش چگالی (جدول ۲)، مقاومت جریان در برابر چرخش در بدنه سایکلون افزایش یافته و مقادیر سرعت مماسی در گردابه خارجی اندکی کاهش می‌یابد؛ به‌طور مثال بیشینه سرعت مماسی در سرعت ورودی ۲۳/۸۵ متر بر ثانیه، با افزایش دما از ۲۹۳K تا ۷۰۰K، ۹/۹۳٪ کاهش دارد. با وجود اختلاف در گردابه خارجی، پروفیل‌های سرعت در هسته گردابه رانکین بر هم منطبق هستند.

#### ۳-۲- راندمان

تغییرات راندمان جمع‌آوری ذرات با دما در سرعت‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش دما میزان بازدهی در حال کاهش است، اما همچنان با افزایش سرعت سیر صعودی دارد. همان‌طوری که در قسمت

با دمای ۲۹۳ کلوین و ضریب انتقال حرارت جابجایی ۳ وات بر مترمربع کلوین تبادل حرارت می‌کنند. برای مرز خروجی هم برای جلوگیری از ایجاد جریان بازگشتی شرط جریان خروجی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است [۸]. ژائو و همکاران [۳۵] شبیه‌سازی عددی سایکلون استفاده شده در این مقاله را با تزریق ۴۰۰۰ ذره انجام دادند. در مطالعه حاضر، برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به تعداد ذرات، ۴۲۰۰ ذره با سرعت ورودی صفر و هم‌دما با سیال ورودی وارد جریان شدند. همه دیواره‌های سایکلون (به جز کف آن) کاملاً الاستیک هستند و ضریب ارتجاع<sup>۲</sup> برابر یک در نظر گرفته شده است [۱۸]. به عبارت دیگر ذرات بعد از برخورد با دیواره، با همان سرعت و زاویه برخورد نسبت به خط عمود بر دیواره، برگردانده می‌شوند. اما اگر ذره‌ای به کف سایکلون برخورد کند به دام می‌افتد. خواص ذره جامد با دما ثابت در نظر گرفته شده است، در صورتی که خواص فاز گازی (هوا) با دما تغییر می‌کند که در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### ۲-۴- اعتبار سنجی حل عددی

به ازای ۱۴۴۴۲۰ سلول مشخص شد که افت فشار و راندمان جمع‌آوری ذرات مستقل از شبکه هستند. سپس این دو پارامتر در دبی‌های مختلف با نتایج تجربی ژائو و همکاران [۱۷] در دمای ۲۹۳ کلوین مقایسه شدند (شکل ۲).

هر دو نمودار روند یکسانی با داده‌های تجربی دارند؛ با بالا رفتن سرعت ورودی، هر دو پارامتر فوق سیر صعودی دارند. با افزایش دبی اختلاف بین مقادیر به دست آمده از حل عددی و آزمایش بیشتر می‌شود. علاوه بر خطاهای ناشی از حل عددی، بالا رفتن سرعت چرخش جریان، موجب افزایش ناهمسانگردی جریان شده و در نتیجه انتظار می‌رود که خطا افزایش یابد. متوسط خطا در هر چهار دبی برای افت فشار ۲/۱٪ و راندمان ۰/۸٪ است. بیشترین درصد خطا در محاسبه افت فشار و راندمان هم به ترتیب برابر

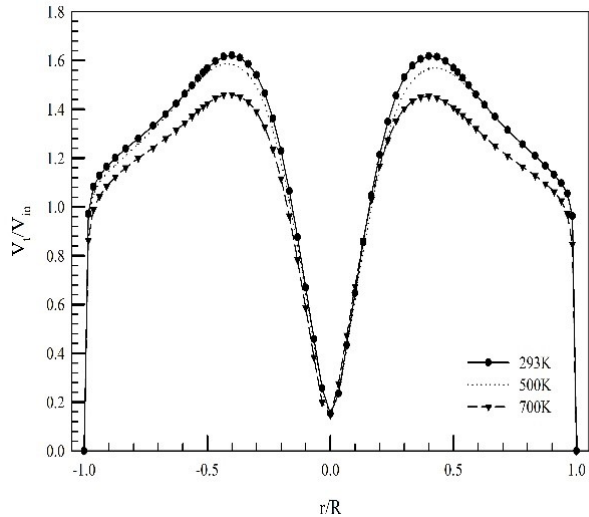
### جدول ۲: خواص ذره و سیال در دماهای مختلف

Table 2. Thermo physical properties of air and solid particles at different temperature

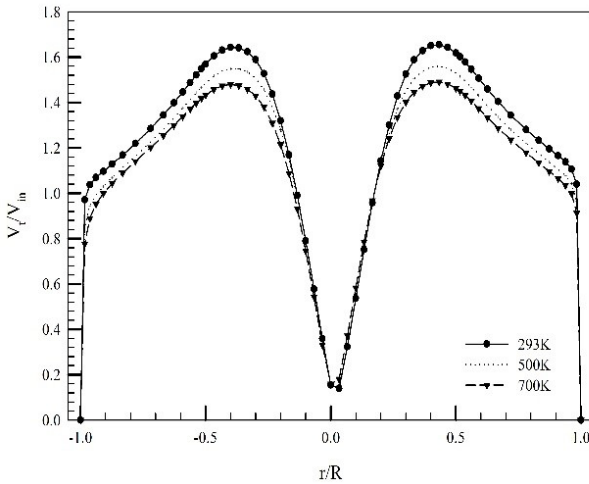
$\mu \times 10^5, \text{ Pa}\cdot\text{sec}$	$k, \text{ W/m}\cdot\text{K}$	$C_p, \text{ J/kg}\cdot\text{K}$	$\rho, \text{ kg/m}^3$	
-	۲۳۷	۹۰۰	۲۷۰۰	ذره جامد
				<b>T, K</b>
۱/۷۸۹۴	-	-	۱/۱۸۸	۲۹۳
۲/۰۸۲	۰/۰۳	۱۰۰۹	۰/۹۹۵	۳۵۰
۲/۳۰۱	۰/۰۳۳۸	۱۰۱۴	۰/۸۷۱۱	۴۰۰
۲/۷۰۱	۰/۰۴۰۷	۱۰۳۰	۰/۶۹۶۴	۵۰۰
۳/۰۵۸	۰/۰۴۶۹	۱۰۵۱	۰/۵۸۰۴	۶۰۰
۳/۳۸۸	۰/۰۵۲۴	۱۰۷۵	۰/۴۹۷۵	۷۰۰

1 outflow

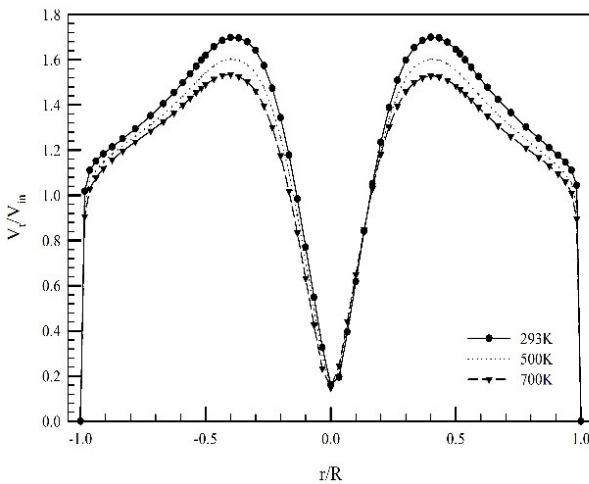
2 Coefficient of restitution



(الف)



(ب)

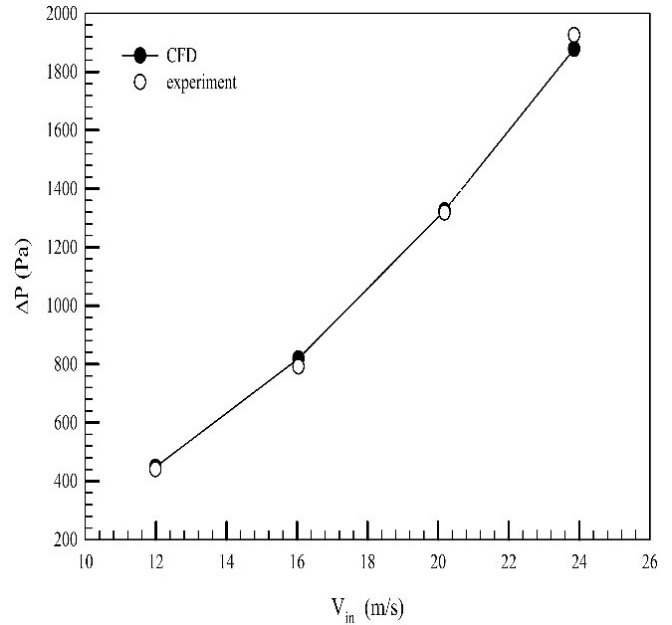


(ج)

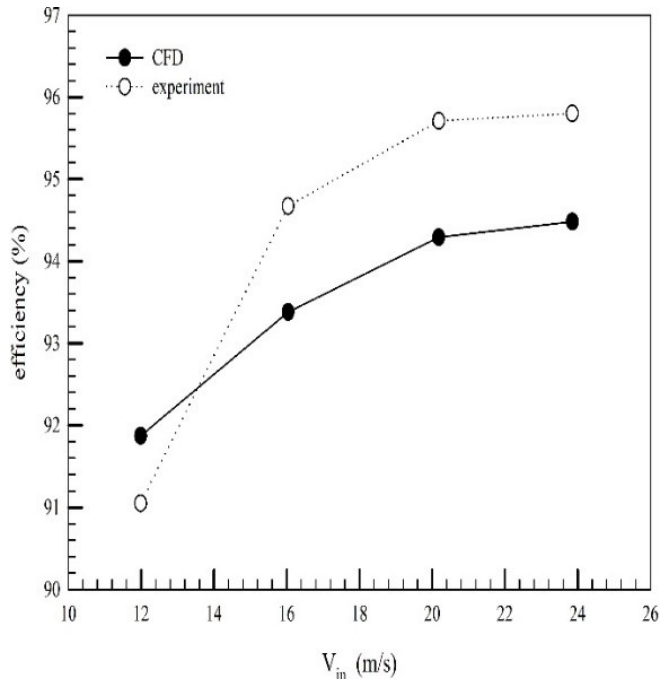
Fig. 3. Dimensionless tangential velocity distribution at ( $Z/D=1.33$ ) (from Top to the bottom:  $V_{in}=11.99, 16.04, 23.85$  m/s)

شکل ۳: پروفیل سرعت مماسی بی‌بعد در مقطع  $Z/D$  برابر با  $۳۳/۱$  (از بالا به پایین: سرعت ورودی  $۱۱/۹۹, ۱۶/۰۴, ۲۳/۸۵$  متر بر ثانیه)

قبل گفته شد، افزایش دما موجب کاهش سرعت مماسی جریان (به‌خصوص در گردابه خارجی) می‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود با کاهش نیروی گریز از مرکز وارد بر ذرات، تعداد کمتری از آن‌ها جذب شوند. بالاترین بازده در دمای ۲۹۳ کلوین و کمترین آن در دمای ۷۰۰ کلوین اتفاق می‌افتد. به‌طور مثال، اگر سرعت ورودی  $۲۳/۸۵$  متر بر ثانیه باشد، بین این دو دما  $۴/۶۴\%$  کاهش راندمان مشاهده می‌شود.



(الف)

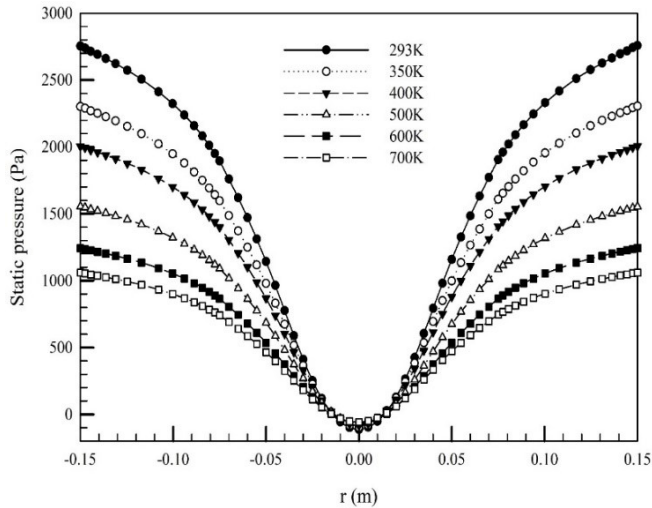


(ب)

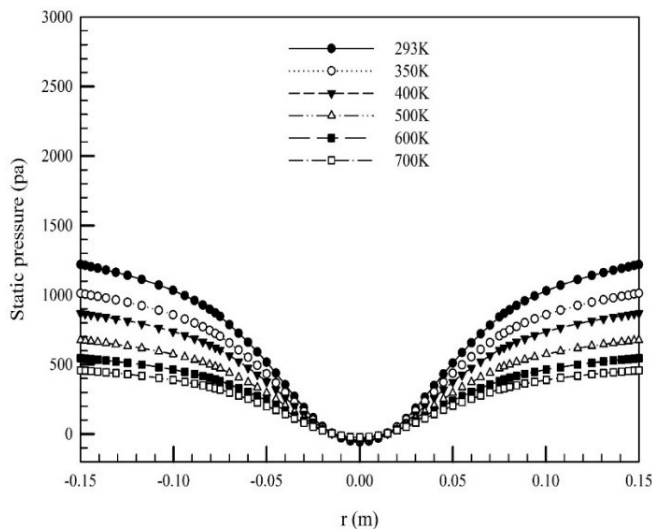
Fig. 2. Comparison of experimental and numerical pressure drop and separation efficiency

شکل ۲: مقایسه افت فشار و راندمان به‌دست‌آمده از حل عددی با مقادیر تجربی

به ذرات وارد شده و در نتیجه راندمان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر افت فشار گردابه نیز بیشتر می‌شود [۳۶]. پس با افزایش دما به علت کاهش سرعت چرخشی جریان، افت فشار و راندمان کاهش می‌یابند. این موضوع را می‌توان در شکل‌های ۶ و ۷ هم مشاهده کرد. افزایش دما باعث می‌شود تا گردابان فشار استاتیک در راستای شعاعی کاهش یافته و پروفیل آن شکل تخت‌تری پیدا کند.



(الف)



(ب)

Fig. 6. Static pressure profile at ( $Z/D=1.33$ ) (from Top to the bottom:  $V_{in}=16.04, 23.85$  m/s)

شکل ۶: پروفیل فشار استاتیک در راستای شعاعی در مقطع  $Z/D$  برابر با  $1/33$  (از بالا به پایین: سرعت ورودی  $16/04$  و  $23/85$  متر بر ثانیه)

### ۳-۴- میدان دما

شکل ۸ توزیع دمای جریان را نشان می‌دهد. بیشینه دما در گردابه خارجی و کمترین آن در انتهای قسمت مخروطی مشاهده می‌شود. با وجود اینکه دیواره‌ها با محیطی که دمای آن از دمای جریان کمتر است

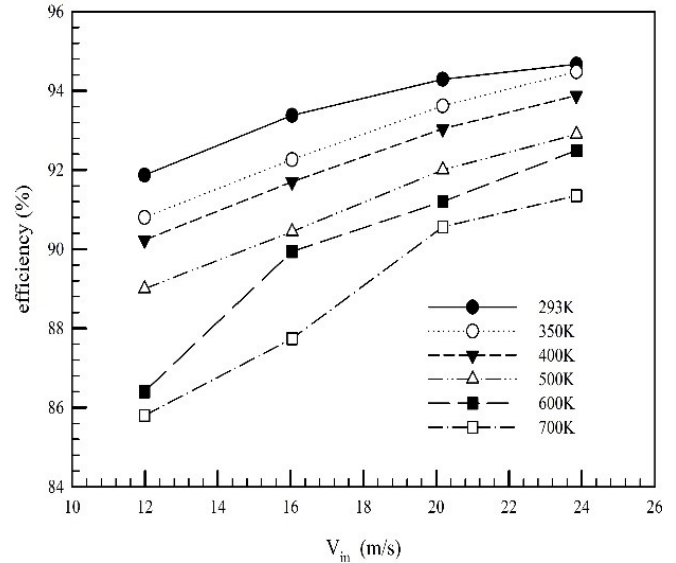


Fig. 4. Variation of separation efficiency at different inlet temperature

شکل ۴: تغییرات راندمان جمع‌آوری ذرات در دماهای مختلف

### ۳-۳- میدان فشار

افت فشار سایکلون، به اختلاف بین فشار استاتیک ورودی و خروجی آن گفته می‌شود [۱۷]. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش دمای ورودی، افت فشار سایکلون در حال کاهش است (شکل ۵). بررسی مقادیر افت فشار در یک سرعت ورودی ثابت بین دماهای مختلف نشان می‌دهد که به ازای هر  $100$  کلون افزایش دما، بین  $14\%$  تا  $16\%$  کاهش افت فشار وجود دارد.

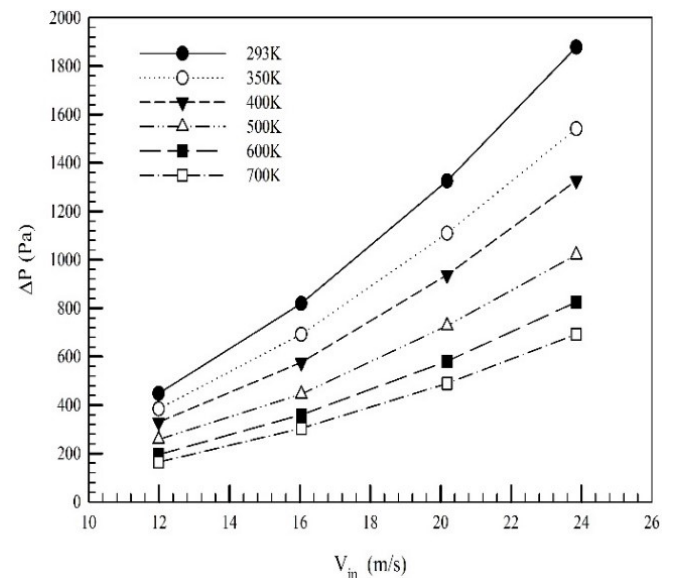


Fig. 5. Variation of pressure drop at different inlet temperature

شکل ۵: تغییرات افت فشار در دماهای مختلف

سرعت مماسی مؤلفه‌ی غالب سرعت جریان درون سایکلون است و به‌عنوان معیاری از قدرت گردابه به حساب می‌آید. هرچه قدر سرعت مماسی سیال در گردابه داخلی و خارجی بزرگتر باشد، نیروی گریز از مرکز بیشتری

بین دمای بیشینه و کمینه در سایکلون کمتر از ۱۰ درجه است، بنابراین می‌توان از تغییرات خواص با دما در یک دمای ورودی ثابت صرفنظر کرد.

انتقال حرارت می‌کنند، باز هم جریان خروجی دمایی نزدیک به دمای ورودی دارد. همانطور که از کانتورهای دما (شکل ۸) مشخص است، حداکثر اختلاف

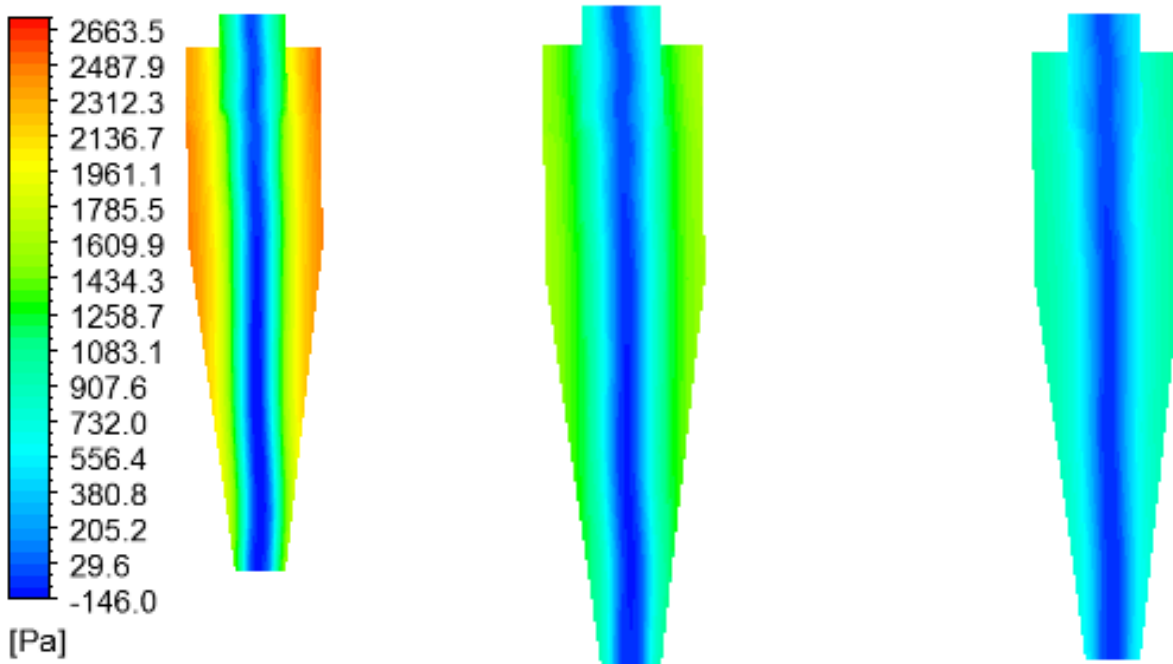


Fig. 7. Contour of static pressure at  $V_{in}=23.85$  m/s (from left to the right:  $T_{in}=350, 500, 700$  K)

شکل ۷: کانتور فشار استاتیک در سرعت ورودی ۲۳/۸۵ متر بر ثانیه (از چپ به راست دمای ورودی ۳۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ کلوین)

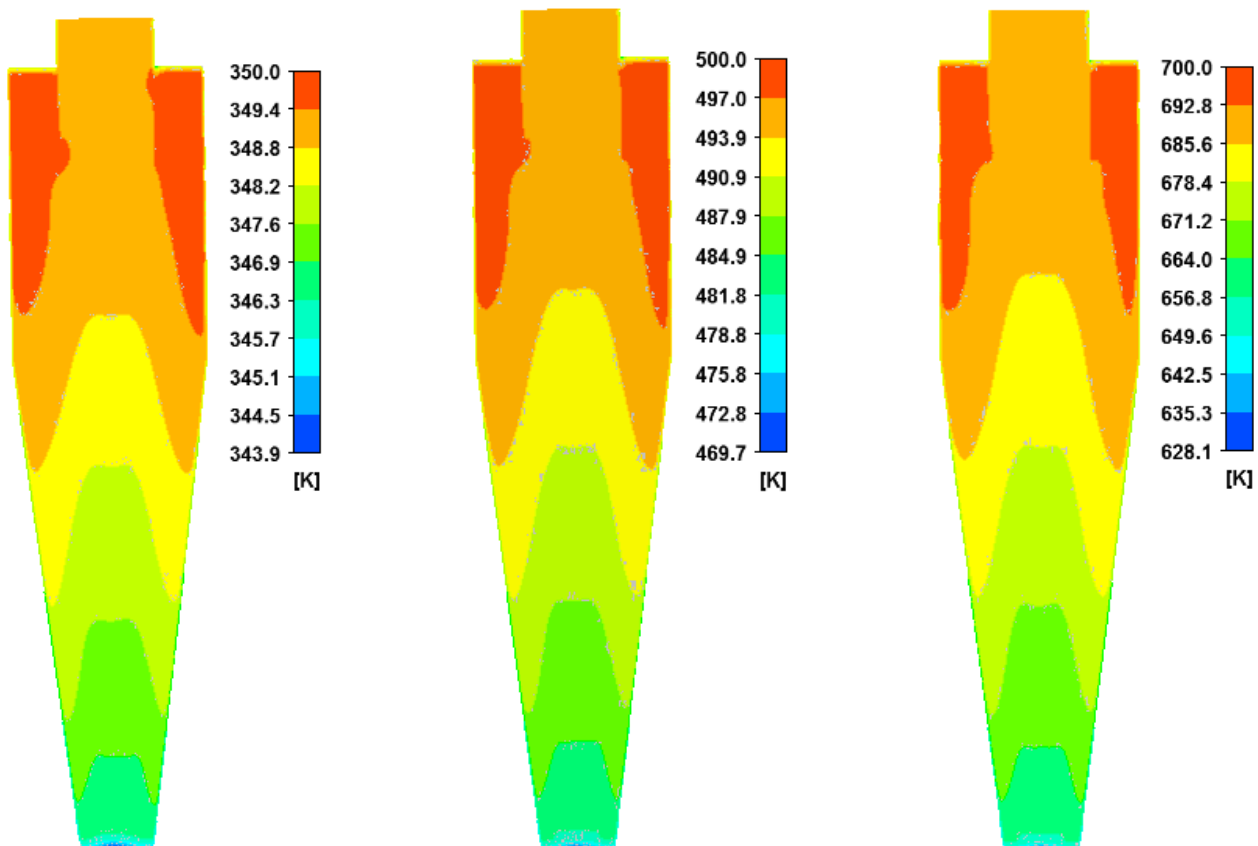


Fig. 8. Contour of temperature at  $V_{in}=23.85$  m/s (from left to the right:  $T_{in}=350, 500, 700$  K)

شکل ۸: کانتور دما در سرعت ورودی ۲۳/۸۵ متر بر ثانیه (از چپ به راست: دمای ورودی ۳۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ کلوین)



$k$	ضریب هدایت حرارتی، W/m.K
$D_{T,P}$	ضریب ترموفورتیک، N
$T$	دما، K
$D_H$	قطر هیدرولیکی، m
$I$	شدت تلاطم
$A$	مساحت، $m^2$
$P$	محیط، m
$a$	ارتفاع ورودی، m
$b$	عرض ورودی، m
$B$	قطر کف سایکلون، m
$D$	قطر سایکلون، m
$D_x$	قطر گردابه یاب، m
$S$	ارتفاع گردابه یاب، m
$H_t$	ارتفاع کل سایکلون، m
$h$	ارتفاع قسمت استوانه‌ای، m
$h$	ضریب جابجایی حرارتی، W/m <sup>2</sup> .K
$\nabla$	گرادیان
	زیرنویس
in	ورودی
p	ذره
t	مماسی
	بالانویس
'	جمله اغتشاشی

کارگوز و کایا [۲۰] با اعمال شرط دما ثابت به دیواره‌ها نتیجه گرفتند که کمترین میزان انتقال حرارت در انتهای بخش مخروطی و بیشترین آن در ورودی سایکلون مشاهده می‌شود؛ اما نتایج مطالعه حاضر، عکس آن را نشان می‌دهد و با نزدیک شدن به انتهای مخروط، دما افت بیشتری پیدا می‌کند و انتقال حرارت بیشتری رخ می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که توزیع دما در سایکلون وابستگی زیادی به شرایط مرزی آن دارد.

#### ۴- جمع‌بندی

شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی درون سایکلون با دیدگاه اوبلری -لاگرانژی از روش حجم محدود برای حل معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم و معادلات تلاطم و با استفاده از روش مرتبه دوم بالادست برای گسسته‌سازی جملات معادلات فوق انجام شد. مهمترین نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان در زیر خلاصه کرد:

- با افزایش دما و به تبع آن، افزایش لزجت دینامیک و کاهش چگالی سیال، میزان سرعت مماسی (چرخش جریان) کاهش می‌یابد. این اختلاف، فقط در قسمت خارجی گردابه رانکین (گردابه آزاد) دیده می‌شود و پروفیل‌های سرعت در هسته گردابه رانکین بر هم منطبق هستند.
- کاهش مقادیر سرعت مماسی موجب می‌شود تا کاهش هم‌زمان درافت فشار و راندمان مشاهده شود.
- با توجه به توزیع دما در سایکلون، نیروی ترموفورتیک که در خلاف جهت گرادیان دما به ذرات وارد می‌شود، اثر منفی بر جمع‌آوری ذرات دارد و آن‌ها را به سمت مرکز گردابه می‌کشاند.

#### فهرست علائم

$\Delta P$	افت فشار، Pa
$V$	سرعت، m/s
$m$	جرم، kg
$s, t$	زمان، s
$u, v, w$	مؤلفه‌های سرعت، m/s
$g$	شتاب جاذبه، m/s <sup>2</sup>
$r$	شعاع، m
$x, y, z$	جهات مختصاتی
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	ویسکوزیته ی دینامیک، Pa.s
$D$	قطر، m
$C_D$	ضریب پسا
$Re$	عدد رینولدز

#### منابع

- [1] Y. Zhu, K. Lee, "Experimental study on small cyclones operating at high flow rates". *Journal of Aerosol Science*, 30(10) (1999) 1303-1315.
- [2] K. Lim, H. Kim, K. Lee, "Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes". *Journal of Aerosol science*, 35(6) (2004) 743-754.
- [3] J. Dirgo, D. Leith, "Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions". *Aerosol Science and Technology*, 4(4) (1985) 401-415.
- [4] J. Gimbut, T. Chuah, T.S. Choong, A. Fakhru'l-Razi, "Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance". *Journal of Aerosol Science*, 36(8) (2005) 1056-1065.

- Science*, 138 (2015) 622-633.
- [17] B. Zhao, H. Shen, Y. Kang, "Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance". *Powder Technology*, 145(1) (2004) 47-50.
- [18] H. Safikhani, M. Shams, S. Dashti, "Numerical simulation of square cyclones in small sizes". *Advanced Powder Technology*, 22(3) (2011) 359-365.
- [19] Y. Su, A. Zheng, B. Zhao, "Numerical simulation of effect of inlet configuration on square cyclone separator performance". *Powder technology*, 210(3) (2011) 293-303.
- [20] I. Karagoz, F. Kaya, "CFD investigation of the flow and heat transfer characteristics in a tangential inlet cyclone", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(9) (2007) 1119-1126.
- [21] J. Gimbut, T. Chuah, A. Fakhru'l-Razi, T.S. Choong, "The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(1) (2005) 7-12.
- [22] C. Shepherd, C. Lapple, *Air pollution control: a design approach*, Cyclones. Second ed., Woveland Press Inc., Illinois, (1939) 127-139.
- [23] C. Song, B. Pei, M. Jiang, B. Wang, D. Xu, Y. Chen, "Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators". *Powder Technology*, 294 (2016) 437-448.
- [24] Y.H. Alahmadi, A.F. Nowakowski, "Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator". *Chemical Engineering Science*, 147 (2016) 150-165.
- [25] M. Masihi, H. Karegar Sharifabad, N. Rahbar, "Numerical simulation of gas-solid cyclone to reduce the air pollution", in: *22nd international conference of Iranian society of mechanical engineers (ISME)*, Ahvaz, Iran, 2014.
- [26] K. Khaksar, N. Moafian, M. Ehsani, M. Ghiath, "Analysis of outlet channel configuration on spiral cyclone", in: *1st conference of oil, gas and Persian Gulf petrochemical*, Busherhr, Iran, 2016.
- [27] M. Khandani, "Necessity of using cyclones at natural gas stations", in: *2nd national conference of knowledge-based improvements of oil, gas and petrochemical industries*, Bandare Emam, Iran, 2015.
- [28] M. Farzanehgard, S. Alenabi, "Separation of soot from natural gas at gas stations using cyclones", in: *3rd conference of applied studies at power engineering, mechanical engineering and mechatronics*, Tehran, Iran, 2015.
- [5] K. Elsayed, C. Lacor, "Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations". *Chemical Engineering Science*, 65(22) (2010) 6048-6058.
- [6] K. Elsayed, C. Lacor, "Modeling, analysis and optimization of aircyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches". *Powder technology*, 212(1) (2011) 115-133.
- [7] G. Gong, Z. Yang, S. Zhu, "Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator". *Applied mathematical modelling*, 36(8) (2012) 3916-3930.
- [8] H. Safikhani, A. Hajiloo, M. Ranjbar, "Modeling and multi-objective optimization of cyclone separators using CFD and genetic algorithms". *Computers & Chemical Engineering*, 35(6) (2011) 1064-1071.
- [9] K. Elsayed, C. Lacor, "CFD modeling and multi-objective optimization of cyclone geometry using desirability function, artificial neural networks and genetic algorithms". *Applied Mathematical Modelling*, 37(8) (2013) 5680-5704.
- [10] M. Azadi, M. Azadi, A. Mohebbi, "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters". *Journal of hazardous materials*, 182(1) (2010) 835-841.
- [11] P. Baltrėnas, A. Chlebnikovas, "Experimental research on the dynamics of airflow parameters in a six-channel cyclone-separator". *Powder Technology*, 283 (2015) 328-333.
- [12] P. Funk, K. Elsayed, K. Yeater, G. Holt, D. Whitelock, "Could cyclone performance improve with reduced inlet velocity?". *Powder technology*, 280 (2015) 211-218.
- [13] N. Fathizadeh, A. Mohebbi, S. Soltaninejad, M. Iranmanesh, "Design and simulation of high pressure cyclones for a gas city gate station using semi-empirical models, genetic algorithm and computational fluid dynamics". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26 (2015) 313-329.
- [14] L.S. Brar, R. Sharma, K. Elsayed, "The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone". *Powder Technology*, 286 (2015) 668-677.
- [15] D. Misiulia, A.G. Andersson, T.S. Lundström, "Effects of the inlet angle on the flow pattern and pressure drop of a cyclone with helical-roof inlet". *Chemical engineering research and design*, 102 (2015) 307-321.
- [16] L. Duan, X. Wu, Z. Ji, Q. Fang, "Entropy generation analysis on cyclone separators with different exit pipe diameters and inlet dimensions". *Chemical Engineering*

- Mechanics*, 55(2) (1972) 193-208.
- [33] L. Talbot, R. Cheng, R. Schefer, D. Willis, "Thermophoresis of particles in a heated boundary layer". *Journal of fluid mechanics*, 101(4) (1980) 737-758.
- [34] B. Zhao, Y. Su, J. Zhang, "Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration". *Chemical Engineering Research and Design*, 84(12) (2006) 1158-1165.
- [35] A.C. Hoffman, L.E. Stein, A.C. Hoffmann, L.E. Stein, *Gas cyclones and swirl tubes*, Springer, 2002.
- [29] S. Shafiei, M. S. Torkesh Esfahani, H. Ajamian, M. Ilchizadeh, "Effects of operational and design parameters on powder classification using cyclones and deposition tank", *Sciences and engineering of separation*, 1 (2) 2010 41-54.
- [30] A. Farzanegan, Z. Mirzaei, "Single objective optimization of Aspheric Phosphate mill circuit using genetic algorithm", *modelling in engineering*, 11 (33) 2013 15-25.
- [31] A. Fluent, *Ansys fluent theory guide*, ANSYS Inc., USA, 15317 (2011) 724-746.
- [32] S. Morsi, A. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems", *Journal of Fluid*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Siadaty and S. Kheradmand, Numerical Simulation of Gas – Solid Cyclone Separators Operating at High Temperatures,

*Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 495-506.

DOI: 10.22060/mej.2016.860



