

بررسی شکل هندسی بر عملکرد سیکلون بکمک شبیه سازی عددی

احمد رضا عظیمیان

استاد

احمد صداقت

استادیار

سید ایمان روح الامین

دانشجوی کارشناسی ارشد

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک.

چکیده جدا کننده سیکلون یکی از پر استفاده ترین وسایلی است که در صنعت برای جدایش غبار از هوا و یا کلاس بندی ذرات مختلف استفاده شده است. چندین نوع الگوی جریان در سیکلونها قابل مشاهده است که این الگوها با توجه به بررسی های تجربی و یا شبیه سازی عددی بدست آمده اند. با توجه به ساختار پروفیل محوری می توان دریافت که سیکلون ها به دو دسته کلی قابل تقسیم هستند: کلاس V ، نماینده سیکلون هایی است که ماکزیمم سرعت محوری در ناحیه هسته مرکزی سیکلون اتفاق می افتد؛ و کلاس W ، نماینده سیکلونهایی است که سرعت محوری دارای الگوی بالا- پایین رونده ای به شکل W است. در این مقاله اثر تغییر قطر لوله خارجی سیکلون بر کلاس بندی آن با استفاده از نرم افزار فلونت ۶، بررسی شده است. برای چند سیکلون بازده بالای نوع استیرمان، با استفاده از مدلهای RSM و $RNG k-\epsilon$ شبیه سازی عددی انجام شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که مدل RSM مرتبه اول و RNG مرتبه اول و دوم در تمامی حالات بررسی شده الگوی سرعت محوری را از نوع V پیش بینی می کنند. این در حالی است که مدل RSM مرتبه دوم، در مقاطعی که نسبت De/D کمتر از 0.4 بوده است، الگوی جریان محوری را از نوع V تخمین زده است. در جایی که نسبت De/D بیشتر از 0.4 بوده است، الگوی جریان بصورت W برآورد شده است. همچنین سعی شده تا با بررسی تواناییهای هرمدل در پیش بینی الگوی جریان در مقاطع مختلف سیکلون، دقت این دو روش در جریانهای پیچیده سریع با ناهمسانگردی زیاد مورد ارزیابی قرار گیرند. با توجه به کمبود داده های تجربی تنها در نسبت $De/D=0.5$ با نتایج تجربی و روش LES در سرعتهای محوری و مماسی مقایسه انجام شده است که دقت مناسب مدل تنش رینولدز مرتبه دو را نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: $RNG k - \epsilon$ ، RSM ، Vortex Finder، سیکلون.

۱. مقدمه

جدا کننده سیکلون یکی از پر استفاده ترین وسایلی است که در صنعت برای جدایش غبار از هوا یا کلاس بندی ذرات مختلف استفاده شده است. در این وسیله گاز حاوی غبار از یک ورودی مماسی وارد یک قسمت استوانه ای شکل می گردد، انحنای موجود در این قسمت باعث می شود که جریان مستقیم گاز به یک حرکت گردابی تبدیل گردد. این جریان گاز بصورت یک گردباد بطرف قسمت پایین سیکلون حرکت می کند و بر اثر گرادیان فشار مثبت و قسمت مخروطی پایین سیکلون تغییر جهت داده و در اثر یک گردباد داخلی بالا رونده از قسمت لوله خروجی گاز تخلیه می گردد. در این بین حرکت گردبادی جریان گاز با ایجاد یک سری نیروهای گریز از مرکز باعث می شود که جریان غبار (با توجه به اندازه و دانسیته آنها) به دیواره سیکلون چسبیده و در اثر حرکت پایین رونده جریان گاز در نواحی نزدیک دیواره به سمت پایین سیکلون و دهانه خروجی غبار هدایت شود. هندسه ساده سیکلون به همراه امکان ساخت آن از جنس های مختلف و امکان کارکرد آن در فشارها و دماهای گوناگون به همراه افت فشار متوسط در سیکلون باعث شده است که این وسیله بطور گسترده ای در صنعت استفاده گردد. همچنین به علت اقلیم خشک ایران و عدم نیاز این وسیله به آب (غیر از سیکلون تر)، این وسیله را به اولین و بهترین وسیله برای جدایش غبار تبدیل کرده است.

در روشهای تجربی با استفاده از روشهای لوله های ضربه^۱، سیمهای داغ الکتریکی، و کاربرد لیزر^۲ توزیع پراکندگی ذرات در سیکلونها اندازه گرفته می شوند که استفاده از این وسایل بسیار وقت گیر و هزینه آنها هم بسیار بالا است [۱]. در سالهای اخیر با ظهور کامپیوترهای دیجیتالی پر سرعت، به کمک روشهای عددی و مدل‌های ریاضی مناسب امکان محاسبه دقیق جریانهای داخل سیکلونها فراهم شده است. هر چند این روشها نیز به نوبه خود با محدودیتهای سخت افزاری و نرم افزاری، حافظه در دسترس، و میزان واحد پردازشگر مرکزی^۳ مواجهند که برای شبیه سازی لازم است. این عوامل در انتخاب مدل فیزیکی و اغتشاشی مناسب تاثیر گذار است.

نتایج عددی به روشهای دینامیک سیالات محاسباتی^۴ و یا اندازه گیریهای تجربی بر روی هندسه های واقعی سیکلون چندین نوع الگوی جریان متفاوت را نشان می دهند. با تغییر سرعت ورودی یا هندسه سیکلون، الگوی سرعت محوری نسبت به دیگر الگوها اختلاف بیشتری را نشان می دهد. این امر باعث شده است که سیکلون ها به دو دسته کلاس V و کلاس W مطابق شکل (۱) تقسیم گردند. کلاس V به آندسته از سیکلون ها اطلاق می گردد که ماکزیمم سرعت محوری آنها در مرکز سیکلون مشاهده می گردد. کلاس W نماینده آندسته از سیکلونها است که الگوی سرعت محوری شبیه به W (یا M) دارند. در این دسته از سیکلونها در محور تقارن سیکلون سرعت محوری ناچیز بوده و یا معمولاً جریان برگشتی مشاهده می شود. این در حالی است که ماکزیمم سرعت محوری در شعاع لوله خروجی سیکلون^۵ رخ می دهد. هندسه های متعلق به دو کلاس V و W اختلاف ناچیزی را نشان می دهند ولی آنچه که از آزمایشهای مختلف بر می آید این است که نسبت قطر لوله خروجی گاز به قطر بدنه سیکلون دارای نقشی اساسی در این کلاس بندی است.

اولین نتایج بدست آمده در مدلسازی سیکلونهای گازی توسط بویسان و همکارانش [۲] ارائه شد. آنها با این فرض که جریان داخل سیکلون نسبت به محور سیکلون دارای تقارن می باشد، یک هندسه دو بعدی را با استفاده از مدل تنشهای جبری برای محاسبه شش مولفه تنش رینولدز استفاده نمودند که با توجه به ورودی نا متقارن سیکلون و ناهمسان گردیهایی موجود در هسته جریان، این فرض از اعتبار پایینی برخوردار بود.

از دیگر شبیه سازیهای تقارن محوری می توان به پژوهشهای صورت گرفته توسط بویسان و همکارانش [۳] و دیویدسون و همکارانش [۴] اشاره کرد که به علت محدودیت مربوط به دو بعدی بودن، نتایج آنها قابل استناد نیست. با افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها و به علت نامناسب بودن هندسه های تقارن محوری، تلاشهای محاسباتی به تحلیل هندسه های سه بعدی گرایش یافت. از جمله این تحقیقات می توان به پژوهش های صورت گرفته توسط زو و سو^۶ در دهه ۹۰، بر اساس مدل $k-\epsilon$ ، کیم و لی [۵] بر اساس مدل RSM ^۷، دیاکوسکی و ویلیامز^۸، بر اساس یک مدل پیشرفته $k-\epsilon$ ، گریفیس و بویسان^۹ بر اساس مدل $k-\epsilon$ ، RNG ، گورتون [۶] بر اساس مدل RSM ، هوکاسترا و همکارانش [۷] بر اساس مدل های $k-\epsilon$ استاندارد و RNG و فردریکسون [۸] بر اساس مدل RSM را اشاره کرد. خلاصه تاریخچه ای از روشهای عددی و تجربی برای سیکلون در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

در این مقاله چند سیکلون بازده بالای نوع استیرمان مطابق جدول ۳، با استفاده از مدل های RSM و $k-\epsilon$ RNG شبیه سازی شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده اند. همچنین سعی شده تا با بررسی تواناییهای هرمدل در پیش بینی الگوی جریان در مقاطع مختلف سیکلون، دقت این دو روش در جریانهای پیچیده سریع با ناهمسانگردی زیاد مورد ارزیابی قرار گیرند.

¹ Impact Tubes

² Laser Doppler

³ CPU

⁴ CFD

⁵ Vortex Finder

⁶ Zhou and Soo

⁷ Reynolds Stress Model

⁸ Dyakowski and Williams

⁹ Griffiths and Boyson

۲. معادلات حاکم

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

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

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

این معادلات دارای شکل کلی معادلات ناویر استوکس هستند که با متوسط گیری زمانی این معادلات جمله اضافی تنشهای رینولدز به سمت راست معادله افزوده شده است. برای بستن دستگاه معادلات فوق باید تنشهای رینولدز بطرز صحیحی مدل گردند. یک روش متداول استفاده از روش بوزینسک^۱ است که تنشهای رینولدز را به گرادیان سرعت متوسط مربوط می کند و به عنوان مثال این شیوه در مدل $k - \varepsilon$ RNG استفاده شده است [۹]:

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

در روش $k - \varepsilon$ RNG طیف وسیعی از یک اتفاق مورد بررسی قرار گرفته و از آنجا که گستره این طیف همگی دارای اثر تعیین کننده در شکل گیری فرایند هدف نیستند، بخش غیر موثر آن از محاسبات حذف و طیف باقی مانده مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد، این کار با روشی به نام حذف مقیاس صورت میگیرد که منجر به معادله دیفرانسیل زیر، برای ویسکوزیته مغشوش می شود:

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\widehat{v}}{\sqrt{\widehat{v}^3 - 1 + c_v}} d \widehat{v} \quad (4)$$

که $\widehat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$ بوده و $c_v \approx 1.0$ می باشد. این معادله در نواحی با رینولدز پایین جواب مناسب تری نسبت به $k - \varepsilon$ استاندارد، برای μ_t می دهد و در رینولدز های بالا تقریباً با حالت استاندارد برابر است. روش دیگر برای مدل کردن تنشهای رینولدز، استفاده از معادلات انتقالی برای هر عبارت در تانسور تنش است، که با یک معادله اضافی برای تعیین مقیاس (معمولاً برای ε)، پنج معادله اضافی در حالت دو بعدی و هفت معادله اضافی در حالت سه بعدی ایجاد می نماید [۱۰-۱۲].

۳. هندسه سیکلون و شرایط مرزی

شبهه بندی سیکلون مورد بررسی در شکل (۲) نشان داده شده است. این یک سیکلون بازده بالای نوع استیرمان با قطر بدنه $D = 0.203 \text{ m}$ و قطر لوله خروجی با اندازه های $De = 0.15D, 0.145D, 0.14D, 0.135D$ می باشد. سیال مورد بررسی جریان

¹ Boussinesq

هوای تراکم ناپذیر با دانسیته $\rho = 1/225 \frac{kg}{m^3}$ و ویسکوزیته $\mu = 1/7894 \times 10^{-5} \frac{kg}{ms}$ است که با سرعت ورودی $19 \frac{m}{s}$ از سیکلون عبور می کند. برای بررسی الگوی جریان، از هندسه ای با شبکه چند ساختاری^۱ با حدود ۴۰۰۰۰۰ المان حجمی استفاده شده است؛ نظیر آنچه که در شکل‌های (۳) نشان داده شده است. المانهای محیطی سیکلون از نوع شش وجهی و در قسمت هسته مرکزی از نوع ترکیبی است. برای ورودی جریان از شرط مرزی سرعت ورودی و در مرز خروجی جریان از شرط فشار خروجی، استفاده شده است. شرایط روی دیواره عدم لغزش بوده و به منظور در نظر گرفتن آثار گرادیان فشار بر الگوی جریان از توابع دیوار غیر تعادلی، استفاده شده است. در توابع دیوار استاندارد فرض میشود که نرخ تولید و اتلاف توربولانس در سلولهای نزدیک دیوار برابر است که این فرض در حالتی که گرادیان فشار قوی بر جریان حاکم است صحیح نمی باشد، به همین علت، تحت روشی به نام توابع دیوار غیر تعادلی، میزان اتلاف و تولید توربولانس در نواحی نزدیک دیوار حل می شوند. تمام نتایج بدست آمده در این بررسی بر اساس روش گسسته سازی درجه یک و دو بوده و برای ایجاد کوپل ما بین معادلات پیوستگی و ممنتوم از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. برای تخمین شدت توربولانس ورودی از رابطه مربوط به جریانهای توسعه یافته در لوله $I = 0.16 Re_{Dh}^{-1/4}$ استفاده شده است.

۴. نتایج و جمع بندی

در این شبیه سازی عددی با کاهش قطر لوله خروجی سیکلون از $De/D = 0.5$ تا $De/D = 0.25$ الگوهای سرعت محوری، مماسی، و مطلق در مقطعی به فاصله $m = 0.1$ زیر لوله خروجی سیکلون استخراج شده و در شکل‌های ۴ تا ۱۵ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل‌های ۴ تا ۷ قابل مشاهده است، مدل RSM مرتبه اول و RNG مرتبه اول و دوم در تمامی این شکل‌ها الگوی سرعت محوری را از نوع V پیش بینی می کنند. این در حالی است که مدل RSM مرتبه دوم در مقاطعی که نسبت De/D کمتر از 0.4 بوده الگوی جریان محوری را از نوع V تخمین زده (ماکزیمم سرعت محوری در وسط سیکلون) و در جایی که بیشتر از 0.4 بوده است الگوی جریان بصورت W می باشد.

از روی این نمودارها مشخص است که نسبت 0.4 در حقیقت حد واسطی بین این دو نوع الگوی جریان محوری است. این نسبت در مقالات کیم و لی، گورتون و فردریکسون 0.26 ، 0.3 ، 0.4 بدست آمده است؛ که با توجه به این که تنها مدل سیکلون فردریکسون از بین گزینه های بالا سیکلون بازده بالای نوع استیرمان می باشد، مشخص است که مدل تنش رینولدز مرتبه دوم به خوبی قادر به پیش بینی کلاس سیکلون می باشد. از دیگر نکاتی که از این شکل‌ها قابل استخراج است این است که در نسبت‌های De/D کمتر از 0.4 مدل RNG مرتبه دوم با دقت بیشتری (نسبت به RNG و RSM مرتبه اول) الگوی جریان محوری را تخمین می زند و می توان از آن برای تخمین نسبی سرعت محوری به عنوان کم هزینه ترین روش استفاده کرد؛ این در حالی است که در نسبت‌های 0.4 و بالاتر این دقت کمتر شده و تنها میتوان به داده های استخراج شده در مدل RSM مرتبه دوم اعتماد کرد. این نتیجه بر نتایج استخراج شده توسط هوکسترا و همکارانش [۷] صحنه میگذارد. اگر عدد چرخش را بصورت اندازه حرکت چرخشی سیال به اندازه حرکت محوری آن تعریف کنیم میتوان عدد چرخش را بر طبق کار یزدآبادی و همکارانش [۱۴] بدین صورت تعریف کرد:

$$S_w = \frac{\pi D_e \cdot D}{4 ab} \quad (5)$$

بررسی نتایج هوکسترا حاکی از آن است که با افزایش عدد چرخش، اختلاف مدل $k - \epsilon$ RNG با نتایج آزمایشگاهی بیشتر می شود، با وجود این در عدد چرخش $2/2$ این مدل تطابق مناسبی را نشان میدهد، و در اعداد چرخش $3/1$ و بالاتر آنقدر

¹ Block Structured

اختلاف زیاد است که نتوان این مدل را استفاده کرد. در مدل ما نیز عدد چرخش از $3/92$ در نسبت $De/D=0/5$ تا $2/74$ در نسبت $De/D=0/35$ تغییر کرده و بخوبی افزایش تطابق در نتایج RNG و RSM مرتبه دو قابل مشاهده است. در شکل‌های ۸ تا ۱۱ سرعت‌های مماسی در مدل‌ها و مرتبه‌های ذکر شده به تصویر کشیده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است، در مرتبه اول در هر دو مدل سرعت مماسی بر هم منطبق بوده و اختلاف زیادی را نسبت به مرتبه دوم نشان می‌دهند. با مقایسه الگوی مماسی در مدل‌های RNG و RSM مرتبه دوم مشخص است که در سیکلون‌های پیش بینی شده در کلاس V ، هر دو مدل، سرعت مماسی مرکز سیکلون را به درستی تخمین می‌زنند. اما در قسمت اطراف سیکلون ($|D/2| \geq 0/05$) مدل RSM جریان را از نوع ورتکس آزاد تخمین زده ولی مدل RNG جریان را از نوع ورتکس اجباری تخمین می‌زند. به هر حال در تخمین سرعت مماسی در کلاس V تطابق بهتری نسبت به کلاس W در دو مدل مشاهده می‌گردد.

در برآورد راندمان سیکلون در جداسازی غبار از گاز، دو عامل سرعت مماسی در ایجاد نیروی گریز از مرکز و سرعت محوری در هدایت ذرات نزدیک دیواره به محفظه مربوط به گرفتن غبار دارای اهمیت هستند. با توجه به تخمین بیشتر سرعت مماسی و کمتر سرعت محوری در اطراف سیکلون در مدل RNG مرتبه دوم، میزان راندمان اندازه‌گیری در این مدل بیشتر از مدل RSM مرتبه دو می‌باشد. بنابراین، در استفاده از این مدل برای تخمین راندمان باید احتیاط کرد. برای مشخص تر شدن این مطلب سرعت مطلق جریان در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ به تصویر کشیده شده است. همانطور که از این شکل‌ها پیداست، مدل RNG مرتبه دو در اطراف سیکلون دارای سرعت مطلق بیشتر نسبت به مدل RSM می‌باشد. این نشان دهنده غالب بودن سرعت مماسی و به طبع تخمین بیش از حد راندمان جمع‌آوری غبار خواهد بود.

۵. مراجع

- [1] Smagorinsky, J., "General experiments with the primitive circulation equation, I. The basic experiment," Month. Wea. Rev., Vol. 91, pp. 99-164, 1963.
- [2] Boysan, F., Ayers, W., and Swithenbank, J., "Fundamental mathematical modelling approach to cyclone design," Trans. Inst. Chem. Eng., Vol. 60, No. 4, pp. 222-230, 1982.
- [3] Boyson, F., Swithenbank, J., and Ayers, W.H., "Mathematical modelling of gas particle flows in cyclone separators," Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol. 4, Gulf Pub., pp. 1307-1329, 1996.
- [4] Davidson, M.R., "Numerical calculations of flow in a hydrocyclone operating without an air core," Appl. Math. Modelling, Vol. 12, pp. 119-128, 1988.
- [5] Kim, J. and Lee, K., "Experimental study of particle collection by small cyclones," Aerosole Sci. Tech. Vol. 12, p. 1003-1015, 1990.
- [6] Gorton-Hulgerth, A., Messung und Berechnung der Geschwindigkeitsfelder und Partikelbannenim Gaszyklon, PhD Thesis, Technical University Graz, 1998.
- [7] Hoekstra, A., Derksen, J., and Akker, H.V.D., "An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones," Chem. Eng. Science, Vol. 54, p.p. 2055-2065, 1999.
- [8] Fredricson, C., Exploratory experimental and teoretical studies of cyclone gasification of wood powder, PhD Thesis, Lulea Tekniska Universitet, 1999.
- [9] Hinze, J.O., Turbulence, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.
- [10] Gibson, M.M. and Launder, B.E., "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer," J. Fluid Mech., Vol. 86, pp. 491-511, 1978.
- [11] Launder, B.E., "Second-Moment Closure: Present and Future?," Inter. J. Heat Fluid Flow, Vol. 10, No. 4, pp. 282-300, 1989.
- [12] Launder, B.E., Reece, G. J. and Rodi, W., "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," J. Fluid Mech., Vol. 68, No. 3, pp. 537-566, 1975.
- [13] Slack, M., Boysan, F., Prasad, R., and Bakker, A., "Advances in cyclone modelling using unstructured grids," Trans. I. Chem.E., Vol. 78, Part A., pp. 1098-1104, 2000.
- [14] Yazdabadi, P.A., Griffiths, A.J., and Syred, N., "Investigations into precessing vortex core phenomenon in cyclone dust separators," Proc. I. Mech. E., Vol. 208, pp. 147-154, 1994.
- [15] Yashida, H., "Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by revised-type cyclone," Physicochemical and Engineering Aspect, Vol. 109, p. 1-12, 1996.

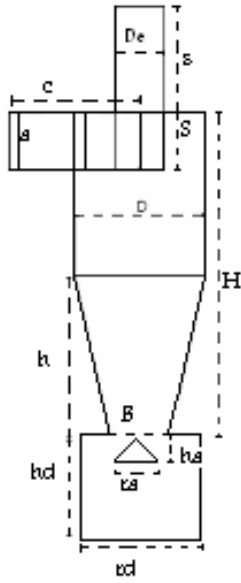
جدول ۱. تعدادی از کارهای محاسباتی و تجربی صورت گرفته در کلاس بندی سیکلونها

Class V	Class W
Simulation	Simulation
Griffits and Boysan (1995), Yashida (1996) Frank and Yu (1999), Ma <i>et al</i> (2000) Horvath (1990)	Slack <i>et al</i> (2000), Penge <i>et al</i> (2001)
Measurment	Measurment
Solero and Coghe(2002) Kim and Lee(1990)	Obermair (2001)
Simulation and Measurment	
Gorton-Hülgerth (1998) Hoekstra <i>et al</i> (1999) Fredriksson (1999), Slack (2001)	

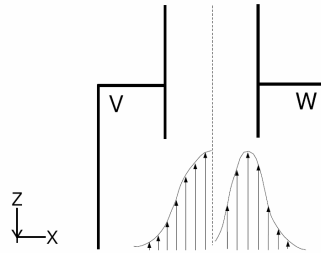
جدول ۲. خصوصیات هندسی و جریان ورودی به سیکلون در هندسه های مورد بررسی توسط فردریکسون، کیم و لی، و گورتون هولگر

	Fredricsson	Kim/Lee	Gorton-Hülgerth
Geometry			
D[m]	0.2	0.0311	0.4
De[m]	0.1	0.08	0.15
S[m]	0.1	0.036	0.175
s[m]	0.15	0.016	0.325
h[m]	0.3	0.045	0.5
H[m]	0.8	0.095	1.0
a;b;c[m]	0.1;0.04;0.2	0.0143;0.00629	0.02
B[m]	0.072	0.013	0.18
ha;ra[m]	-	-	0.08;0.09
hd;rd[m]	0.2;0.133	0.0311;0.02073	0.3;0.15
Air Flow			
$\dot{v}[m^3/s]$	0.08	0.0003066	0.222
v_x	20.0	3.4	12.7
Simulations prameter			
hybrid	hybrid	hybrid	hybrid
Number of cells	645000	56000	478000
Turb.Model	RSM	Laminar/RSM	RSM

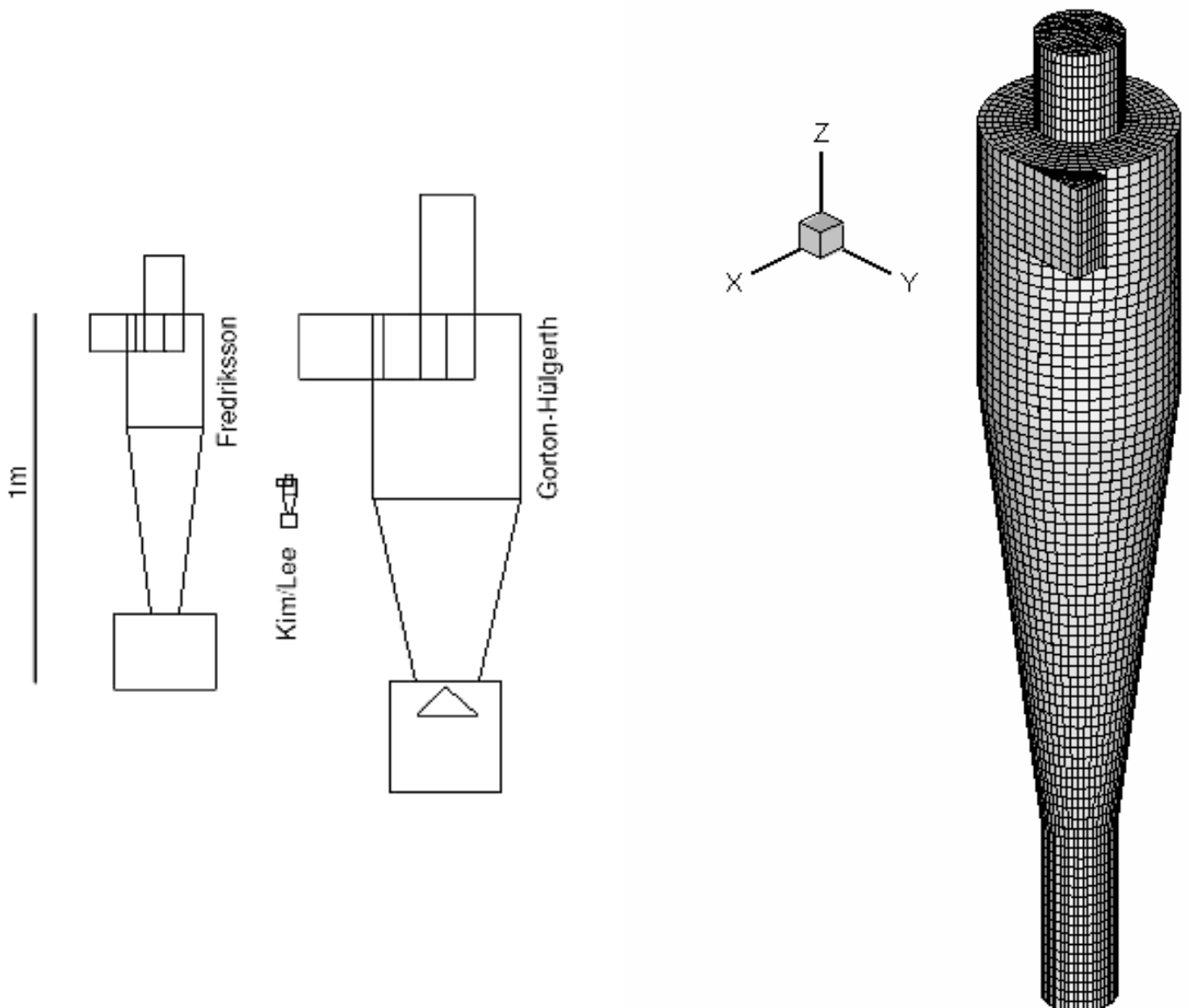
جدول ۳. ابعاد سیکلون های مورد بررسی



0.203 m	قطر سیکلون	D
$De/D=0.5,0.45,0.4,0.35$	قطر لوله خروجی (vortex finder)	De
0.5D	طول لوله خروجی	S
0.5D	امتداد لوله خروجی	s
2.5D	ارتفاع قسمت مخروطی	h
4D	ارتفاع سیکلون	H
0.5D	ارتفاع ورودی	a
0.2D	پهنای ورودی	b
0.5D	طول ورودی	c
D	ارتفاع لوله خروجی غبار	hd
$0.375D,0.375D$	قطر لوله خروجی غبار	rd, B
0,0	مخروط محفظه غبار گیری	Ds, hs

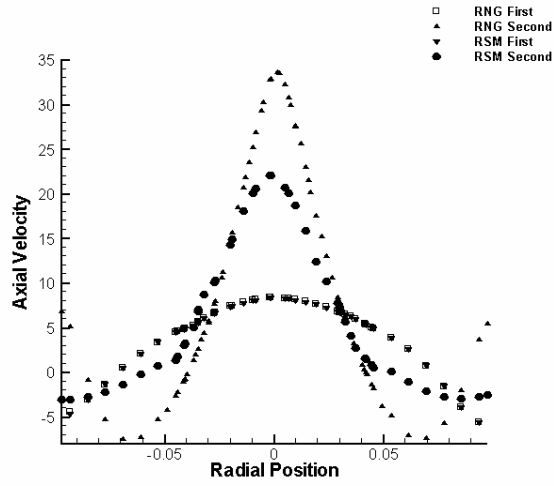


شکل ۱. نمایش الگوهای سرعت محوری در دو سیکلون کلاس V و W

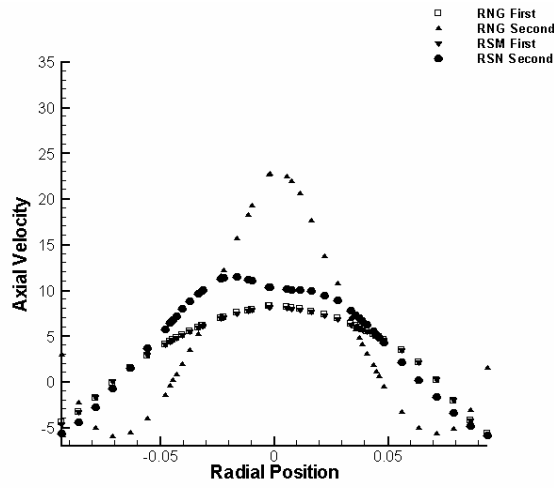


شکل ۳. هندسه های استفاده شده توسط فردریکسون، کیم و لی، و گورتون هولگر

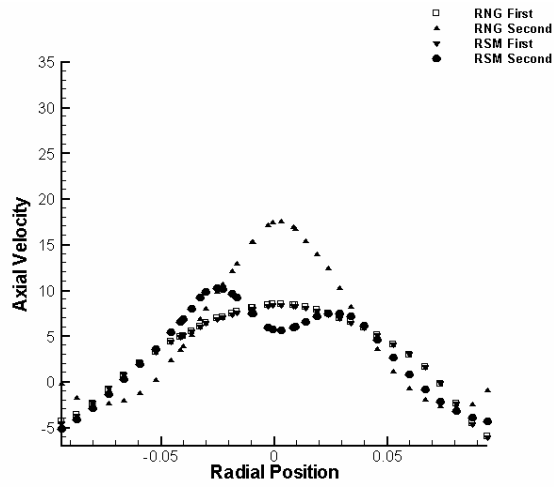
شکل ۲. ساختار مش بندی سیکلون



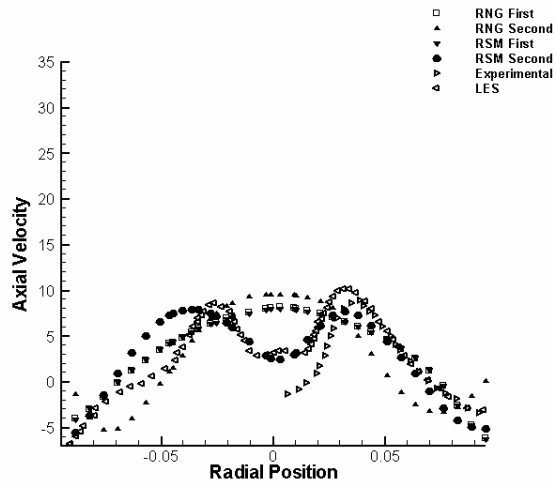
شکل ۴. سرعت محوری بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.35$)



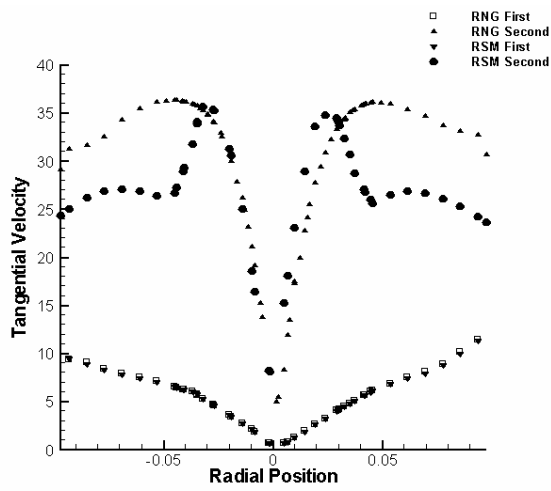
شکل ۵. سرعت محوری بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.4$)



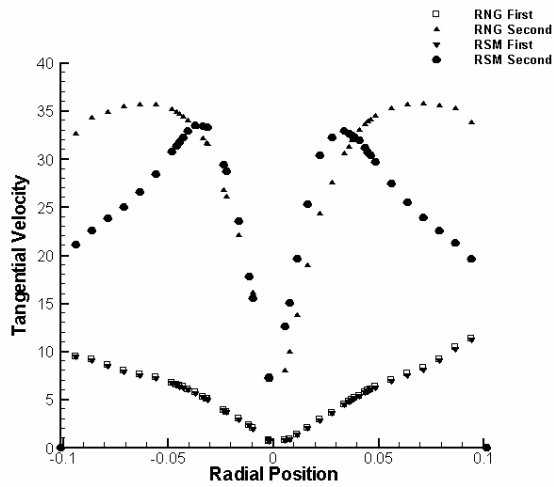
شکل ۶. سرعت محوری بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.45$)



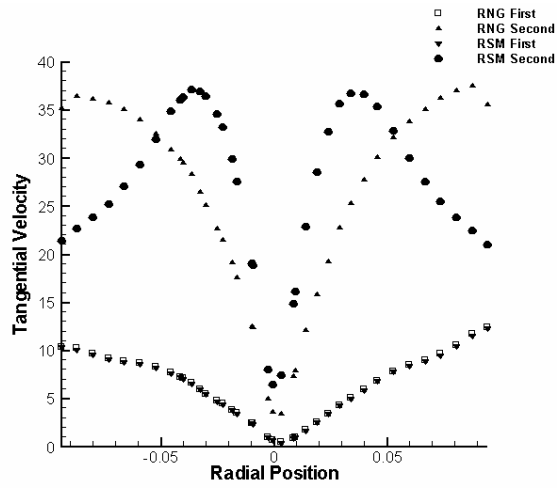
شکل ۷. سرعت محوری بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.5$)



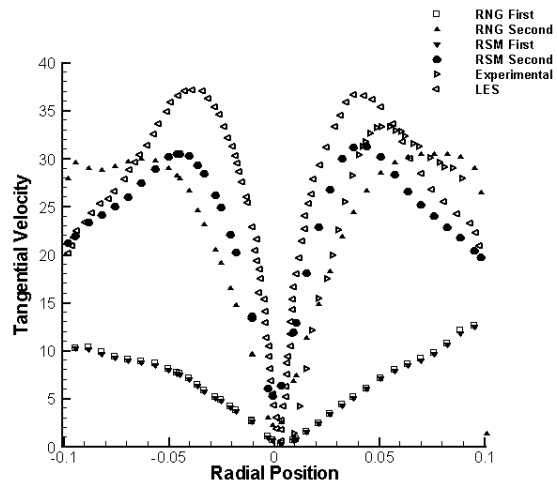
شکل ۸. سرعت مماسی بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.35$)



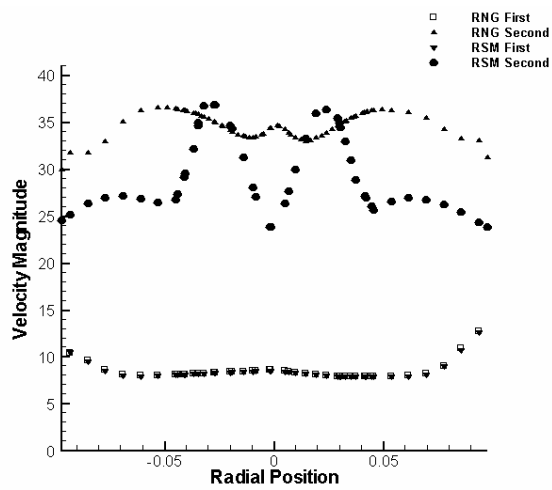
شکل ۹. سرعت مماسی بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.4$)



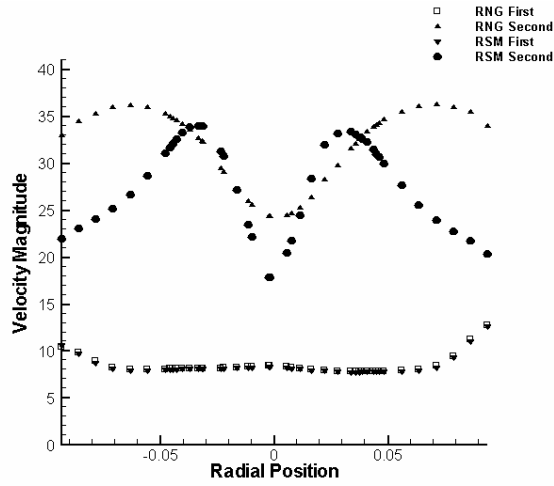
شکل ۱۰. سرعت مماسی بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.45$)



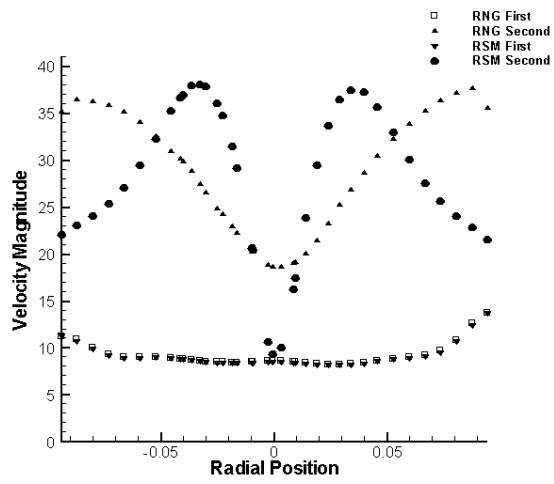
شکل ۱۱. سرعت مماسی بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.5$)



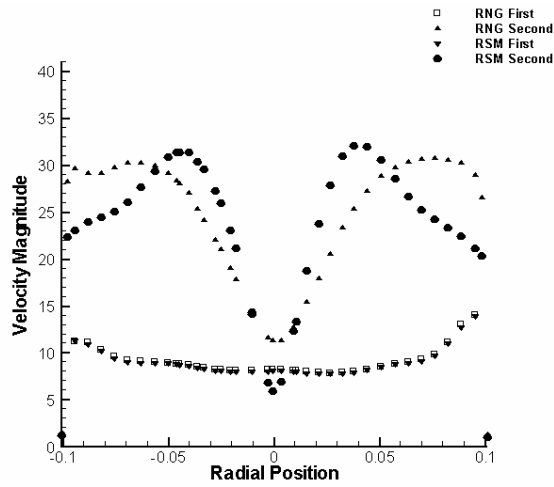
شکل ۱۲. سرعت مطلق بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.45$)



شکل ۱۳. سرعت مطلق بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.4$)



شکل ۱۴. سرعت مطلق بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.45$)



شکل ۱۵. سرعت مطلق بر حسب فاصله شعاعی ($De/D=0.5$)