



مقایسه مدل توربولانسی LES و $K-WSST$ در جریان گردابه سیکلون‌های نمزدا

سمیه سرکرده^۱، حامد حوری جعفری^۲

^۱کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، تهران.

پست الکترونیکی: s61_s61@yahoo.com

^۲استادیار، موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، تهران.

پست الکترونیکی: h_jafari@iies.net

چکیده

جداکننده‌های سانتریفیوژی نقش مهمی در جداسازی ذرات معلق در گازها و مایعات دارند. جداکننده‌های سیکلونی گاز به طور گسترده در صنعت برای جداکردن گرد و غبار از گاز، به دلیل سادگی هندسه و اقتصادی نسبی در مصرف برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش مدل‌سازی عددی جریان گردابه در سیکلون‌های نمزدا به روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. هدف از این مدل‌سازی، مقایسه مدل‌های توربولانسی ال-ای-اس و کی-امگا اس اس تی در حالت ناپایدار می‌باشد. معادلات فاز پیوسته از روش حجم محدود گسسته سازی شده و برای ارتباط بین معادلات پیوستگی و مونتوم از الگوریتم سیمپل ارائه شده توسط پاتانکار استفاده شده است. در این شبیه سازی، جریان بصورت توربولانس، تراکم‌ناپذیر، سه‌بعدی، تک‌فاز و غیرلزج در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل آر-اس-ام در مقطع $Z=130\text{mm}$ نسبت به مدل کی-امگا اس اس تی ارجحیت دارد. در این پژوهش برای مدل‌سازی از نرم افزار سالیید ورکس، برای شبکه بندی و تحلیل جریان از نرم‌افزار فلوئنت و به منظور پردازش نتایج از نرم افزارهای سی-اف-دی پست و تک پلات بهره گیری شده است.

کلمات کلیدی: مدل کی-امگا اس اس تی، مدل ال-ای-اس، شبیه سازی عددی، جریان گردابه‌ای.

۱. مقدمه

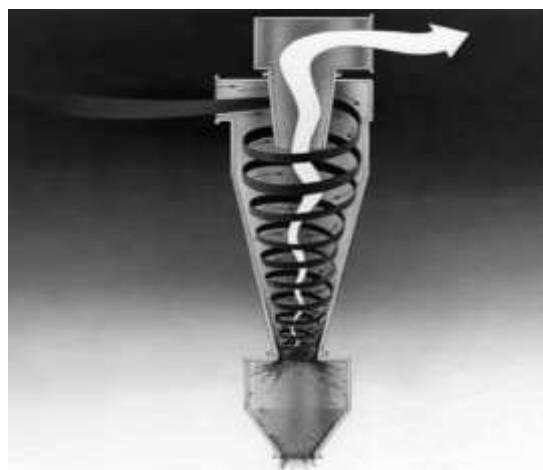
جداکننده‌های سیکلونی در صنعت به طور گسترده برای جداسازی ذرات استفاده می‌شود. عملکرد این جداکننده ها به گونه ایست که با استفاده از نیروی گریز از مرکز، ذرات را از جریان گاز جدا می‌کنند. مزایای اصلی سیکلون‌ها مقرون به صرفه گی، سادگی در ساخت و ساز و سازگاری با طیف گسترده‌ای از شرایط عملیاتی می‌باشد. جریان در سیکلون‌های جداکننده پیچیده، همراه با چرخش بالا و کاملاً سه بعدی است. این امر منجر به بسیاری از تحقیقات به منظور درک اثر هندسه و پارامترهای مختلف بر عملکرد و ویژگی های هیدرودینامیک سیکلون‌های جداکننده شده است [۱].

در این نوع سیکلون‌ها جریان ورودی به صورت مماس به بدنه استوانه‌ای سیکلون از بالای محفظه وارد می‌شود، سپس با ورود جریان به درون استوانه دستگاه جریان از حالت مستقیم به حالت چرخشی در می‌آید. با توجه به هندسه سیکلون این جریان بین دیواره داخلی سیکلون و دیواره دهانه خروجی ایجاد شده و به سمت پایین حرکت می‌کند. به این جریان ورتکس اصلی گفته می‌شود. ورتکس اصلی حتی پایین تر از دهانه خروجی ادامه یافته و تا انتهای محفظه حرکت می‌کند. سرعت محوری این جریان در نزدیکی انتهای سیکلون معکوس می‌شود و جریان ورتکس با حفظ جهت چرخش خود به سمت بالا ایجاد می‌گردد. بنابراین، جریان ورتکس ثانویه‌ای در هسته سیکلون ایجاد شده که جهت حرکت آن رو به بالا و به سمت دهانه خروجی خواهد بود. شکل ۱ شمای کلی یک جداکننده‌ی سیکلونی را نشان می‌دهد.

دو عامل مهم که در تعیین عملکرد سیکلون در نمونه‌های آزمایشگاهی نادیده گرفته می‌شود ناپایداری و وجود تقارن در سیکلون است. دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند با دقتی مطلوب جهت تحلیل رفتار هیدرودینامیکی سیکلون‌ها به



کار گرفته شود. انتخاب مدل مناسب و روش‌های عددی جهت دستیابی به نتایج دقیق امر ضروری است.



شکل ۱. نمایی از سیکلون جداکننده.

۲. بدنه اصلی مقالات

السايد و لکور درباره اثر ابعاد گرداب یاب در سیکلون بر الگوی جریان و عملکرد آن با استفاده از ال - ای - اس مقاله ای ارائه داده‌اند. در این تحقیق اثر ابعاد گرداب یاب (قطر و طول آن) بر عملکرد و الگوی جریان در ۹ سیکلون جداکننده به صورت محاسباتی با استفاده از شبیه سازی گرداب بزرگ (ال - ای - اس) بررسی شد. مدل تلاطم به شبیه سازی گرداب بزرگ با استفاده از الگوریتم ضمنی کوپل شده همراه شده است [۱].

یانگ و همکاران به مطالعه عددی افزایش جداسازی توسط آرایش ذرات روی مینی هیدروسیکلون‌ها پرداختند. مینی هیدروسیکلون‌ها براساس بهترشدن جداسازی ذرات ریز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی طراحی شده است. این مقاله براساس آرایش ذرات در ورودی مینی هیدروسیکلون‌ها پایه گذاری شده است [۲]. گرونالد و همکاران جریان تک فاز سیکلون گازی را با مدل‌های توربولانسی میانگین تنش رینولدز ناویراستوکس و شبیه سازی گردابه‌های بزرگ، تحلیل کردند. جهت صحت‌سنجی، نتایج را با مدل آزمایشگاهی موجود در ادبیات پیشین مقایسه شد [۳].

ژائو و همکاران الگوی جریان و راندمان جدایش برای سیکلون با یک ورودی و دو ورودی را مدل‌سازی نموده یکی برای توصیف عملکرد سیکلون‌ها با ورودی معمولی تک و دیگری برای توصیف عملکرد سیکلون‌های دارای دو ورودی ماریچ به کار گرفته شده است. در این پژوهش معادلات ناویراستوکس در اعداد رینولدز متوسط با مدل توربولانس تنش رینولدز برای جریان سیال با استفاده از روش حجم محدود بر اساس الگوریتم تصحیح فشارسیمپل در دامنه محاسباتی سیال حل شده است. روش لاگرانژی نیز برای بررسی حرکت ذرات و محاسبه راندمان جدایی گاز - ذرات در سیکلون‌ها بکار برده شد [۴].

قاسمی و همکاران مدل‌سازی سیکلون جدا کننده گاز- مایع و بهینه سازی پارامترهای هندسی تاثیرگذار، بررسی کردند. در این مطالعه به بررسی عملکرد جداکننده گاز- مایع استوانه‌ای و تأثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی سیکلون و شبیه سازی آنها به روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. پس از انتخاب شبکه بندی مناسب برای هندسه ی سیکلون،



تأثیر تغییر پارامترهای هندسی ورودی بر مقدار حمل مایع از بالا و مقدار حمل گاز از پایین مطالعه گردید. پارامترهای هندسی به خصوص هندسه‌ی ورودی تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد سیکلون نشان داد. در این طراحی، سطح مقطع ورودی، زاویه‌ی ورودی و ارتفاع ورودی از کف سیکلون به‌طور هم‌زمان بهینه شد. از مدل آر-اس-ام برای شبیه‌سازی جریان آشفته استفاده شده و جریان دوفازی نیز با استفاده از روش اویلر-اویلر مدل‌سازی گردید [۵].

در این پژوهش مدل‌سازی عددی جریان گردابه در سیکلون به روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. برای تحلیل جریان از مدل توربولانسی کی-امگا اس‌اس‌تی و آل-ای-اس در حالت‌های پایدار و ناپایدار استفاده شده و برای پیدا کردن بهینه‌ترین مدل توربولانسی در تحلیل جریان سیکلون، مدل‌ها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۳. معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان گاز در یک سیکلون، معادلات پیوستگی و مومنتوم است که در یک سیستم مختصات غیرشتابدار در حالت پایدار و غیرقابل تراکم به ترتیب به شکل روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شوند:

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

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{(u_i u_j)} \right) \quad (2)$$

این نکته قابل ذکر می‌باشد که تجزیه جریان به دو قسمت متوسط و نوسانی، نیاز به حل دوباره مولفه‌های نوسانی جریان را جهت محاسبه مقادیر متوسط برطرف می‌نماید. سیستم معادلات شامل تانسور درجه دوم $\overline{(u_i u_j)}$ که معمولاً تانسور تنش رینولدز نامیده می‌شود، می‌باشد. تمام اثرات حرکت مغشوش سیال در این ترم قرار گرفته است [۶]. در مجموع ده مجهول وجود دارد (سه مؤلفه مجهول سرعت، یک مؤلفه فشار و شش مؤلفه تنش رینولدز) که تنها چهار معادله (پیوستگی و سه معادلات مومنتوم) جهت پوشش دهی موجود است. بنابراین به شش معادله دیگر برای کامل شدن حل مساله نیاز است. بسته به روشی که تانسور تنش رینولدز مورد ارزیابی قرار گیرد دو طبقه بندی اصلی وجود دارد که عبارتند از: مدل‌های لزجت گردابه‌ای ۱ و مدل تنش رینولدزی ۲ تانسور تنش رینولدز که از میانگین‌گیری زمانی معادلات ناویراستوکس به‌دست می‌آید و توسط جایگزینی آن با حاصلضرب لزجت گردابه‌ای در گردابان‌های سرعت کامل می‌گردد. به این روش فرض بوزینسک ۳ گفته می‌شود.

$$\overline{u_i u_j} = -v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

¹ Eddy Viscosity Models (EVM)

² Reynolds Stress Model (RSM)

³ Boussinesq Assumption



V_t در معادله بالا لزجت سینماتیک مغشوش می‌باشد. برای اینکه معادله (۲) در معادله (۱) نیز صدق کند به شکل رابطه (۴) بازنویسی می‌شود [۷].

$$\overline{u_i u_j} = -v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (4)$$

که δ_{ij} دلتا کرونکر بوده و $\delta_{ij} = 1$ اگر $i=j$ ، $\delta_{ij} = 0$ اگر $i \neq j$ ، همچنین k انرژی مغشوش سینماتیک به شکل رابطه (۵) است.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (5)$$

به طور کلی تانسور تنش رینولدز با مقادیر مجهول، توسط روش‌هایی تقریب زده می‌شود که این روش‌ها را مدل‌سازی توربولانس می‌گویند. مدل‌های توربولانس مطابق با روش‌های پیشنهادی جهت تقریب تانسور تنش رینولدز و حل معادله رینولدز طبقه‌بندی می‌گردند.

۳-۱. مدل توربولانسی ال-ای-اس

برخلاف مدل‌های قبلی در مدل ال-ای-اس تنها تلاطم‌هایی که در مقایسه با ابعاد شبکه بزرگ می‌باشند مورد حل قرار گرفته، و گردابه‌هایی که با توجه به اندازه شبکه محاسباتی کوچک تلقی می‌شوند از طریق مدل آشفتگی زیر شبکه ایی ۱ مورد پردازش قرار می‌گیرند. موضوع منطقی در ارتباط با مدل ال-ای-اس این است که اساساً مقیاس‌های بزرگ کمیت‌ها در انتقال قسمت عمده مومنتوم، جرم و انرژی دخالت داشته و در مقایسه با مقیاس‌های کوچک کمیت‌ها به خصوصیات مسئله همچون هندسه و شرایط مرزی حساس‌تر می‌باشد. این نگرش روندی کلی‌تر را جهت ساده‌سازی مدل شبیه‌سازی فراهم می‌کند؛ بنابراین قسمت زیادی از تاثیرات مربوط به تلاطم‌های ناشی از آشفتگی قابل حل می‌گردد. معادله ناویر-استوکس به جای متوسط‌گیری فیلتر شده و در رویکرد حل به روش حجم محدود کمیت‌های دارای مقیاس کوچکتر از ابعاد حجم کنترل، معمولاً از طریق مدل زیر شبکه‌ای مورد حل قرار می‌گیرند [۸]. فیلتر نمودن معادله ناویر-استوکس رابطه (۶) را به دنبال دارد:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

دو خط افقی بر روی کمیت‌ها نشان دهنده فیلتر شدن آن کمیت است و ترکیب روابط به همراه ویسکوزیته زیر شبکه به شکل رابطه (۱۳) معادلات مدل آشفتگی ال-ای-اس را معرفی می‌کند:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_{sgs}) \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right] \right\} \quad (7)$$

۳-۲. مدل توربولانسی کی-امگا اس تی

مدل کی-امگا اس تی در فلوئنت مبتنی بر مدل ویلکاکس می‌باشد که این مدل برای پیش‌بینی نرخ انتشار برشی آزاد در نزدیکی دیوار، لایه‌های مخلوط و جت‌های شعاعی است و به همین دلیل قابل استفاده برای جریان‌های محدود دیوار و برشی آزاد است این مدل دو معادله‌ای، ترکیبی از مزایای جریان آزاد مدل کی-اپسیلون و جریان محدود به دیواره‌ی مدل کی-امگا است. معادلات انتقال برای انرژی جنبشی توربولانس K و نرخ تلفات مخصوص ω به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

¹ Sub-Grid Scale (SGS) Model



در این معادلات G_k نشان دهنده تولید انرژی سینتیکی آشفتگی با توجه به میانگین گرادیان سرعت، G_w نشان دهنده تولید w ، Γ_k و Γ_w دیفیوژن موثر k و w به ترتیب می باشند. Y_k و Y_w نشان دهنده از بین رفتن k و w به علت آشفتگی است.

۴. الگوریتم حل

سیستم شبیه‌سازی شده، سیکلونی شامل یک ورودی مماسی و خروجی محوری می‌باشد که جریان را به صورت مماسی وارد استوانه اصلی نموده و پس از جداسازی، ذرات را از لوله انتهایی سیکلون و جریان گاز پاکسازی شده را از گردابه یا بارج خارج می‌سازد. مش‌بندی به صورت شش‌وجهی و ساختاریافته صورت گرفته که باعث افزایش دقت و کاهش زمان محاسبات می‌گردد. به منظور گسسته سازی جملات جابه‌جایی در معادلات حاکم بر سیستم از رویکرد کوئیک^۲ و جهت حل معادلات گسسته شده از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است. معادلات حاکم به روش حجم محدود برای تمام دامنه محاسباتی سیستم حل شده و از مدل آر-اس-ام و مدل آر-ان-جی کی اپسیلون و مدل ال-ای-اس استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها به صورت پایا و ناپایا و سه‌بعدی انجام گرفته و بازه زمانی معادل $\Delta t=0.001$ ثانیه انتخاب شده است.

۴-۱. شرح مسأله

هدف اصلی از حل این مسأله تحلیل جریان گردابه درون سیکلون و تعیین خصوصیات جریان اعم از سرعت و فشار با استفاده از معادلات توربولانسی و مقایسه دو مدل توربولانسی آر-اس-ام و آر-ان-جی کی اپسیلون در حالت پایا و دو مدل آر-اس-ام و ال-ای-اس در حالت ناپایا می‌باشد.

۴-۲. فرضیات مسأله

در این پروژه جریان سیال پیوسته، تراکم ناپذیر، تک فاز، با سیال عامل هوا به همراه مشخصات ذکر شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده است [۳].

جدول ۱. مشخصات سیال					
هوا	چگالی	لزجت	دما	فشار	سرعت
	kg/m^3	kg/m.s	$^{\circ}\text{C}$	atm	m/s
	۱/۱۷	۱/۸e-۵	۲۰	۱	۱۲/۶۸

شرایط مرزی مسأله که در نرم افزار فلونت مورد استفاده واقع شده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. شرایط مرزی					
ورودی	خروجی	دیوار	شدت توربولانسی	قطر هیدرولیکی ورودی	قطر هیدرولیکی خروجی
سرعت ورودی ^۴	فشار خروجی ^۱	بدون لغزش ^۲	۲/۷٪	۰/۱۱۷	۰/۱۵

¹ Vortex finder

² Quick

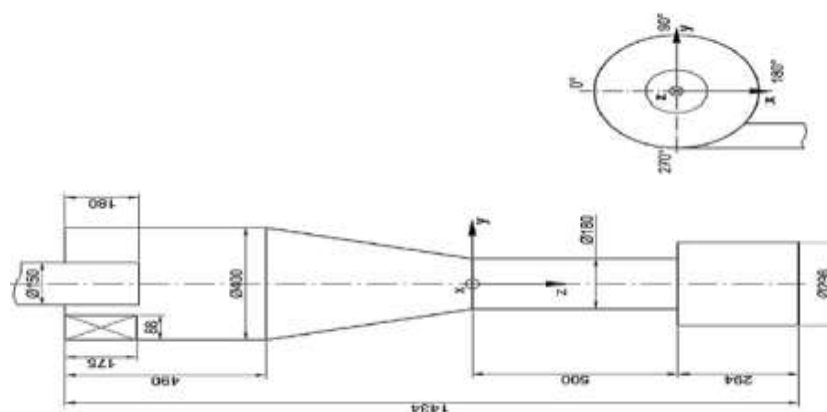
³ Simple

⁴ Velocity Inlet



۳-۴. هندسه مسأله

به منظور حصول اطمینان از صحت پردازش عددی به کمک نرم افزار، ابتدا سیکلونی که پیش تر توسط گرونالد^۳ و همکاران [۳] مورد تحلیل واقع شده و پاسخ‌ها با نتایج تجربی مقایسه گردیده شده بود توسط نرم افزار فلونت مجدداً حل و نتایج با نمودارهای مرجع مقایسه گردید. ابعاد هندسی مدل شده توسط گرونالد برحسب میلی متر در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. ابعاد هندسی سیکلون (میلی متر)

۴-۴. طراحی مدل

برای طراحی هندسه سیکلون به صورت سه بعدی از نرم افزار سالیدورکس^۴ ۲۰۱۶ استفاده شد. مدل طراحی شده در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. مدل سه بعدی سیکلون

¹ Pressure Outlet

² No Slip

³ G.GRONALD

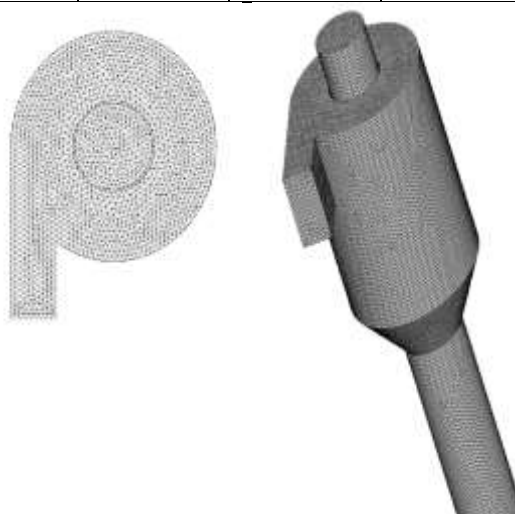
⁴ Solid works



۴-۵. تولید شبکه

برای تولید شبکه محاسباتی از نرم افزار فلونت مشینگ ۱ وابسته به بسته نرم افزاری انسیس ۲۰۱۶ بهره‌گیری شده و به منظور بررسی استقلال پاسخ‌ها از مش، سه شبکه محاسباتی با اندازه‌های متفاوت تولید گردیده که ویژگی‌های هر یک در جدول ۳ گردآوری شده است. شکل ۴ شمایی از شبکه بندی سیکلون را نشان می‌دهد.

جدول ۳. اطلاعات شبکه بندی			
اطلاعات مربوط به شبکه محاسباتی	درشت المان	متوسط المان	ریز المان
تعداد گره	۲۷۱۳۶۵	۳۶۶۲۲۸	۵۳۱۴۶۵
تعداد المان‌های مثلثی	۱۲۲۸۲۱۰	۱۵۹۷۵۱۲	۲۲۰۰۱۴۶
تعداد المان‌های مربعی	۴۸۷۲۶۶	۶۲۶۷۵۷	۸۴۷۷۵۸
بیشترین نرخ کشیدگی	۰/۸۴۳	۰/۸۴۶	۰/۸۲۸



شکل ۴. نمایش شبکه بندی در سیکلون

۴-۶. بررسی استقلال از شبکه

به منظور اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از تحلیل نرم افزاری و عدم وابستگی جواب‌ها به شبکه لازم است که بعد از هر بار حل توسط نرم افزار مطالعه شبکه انجام شود. طی این رویه ابتدا با استفاده از یک شبکه اولیه و تعداد سلول‌های معقول جریان سیال حل و جواب‌ها مشاهده می‌گردند. سپس یک شبکه بندی جدید با تعداد سلول‌های بیشتر تولید شده و دوباره جریان سیال را حل می‌شود و این فرایند تا جایی ادامه می‌یابد که جواب‌های مسئله مستقل از تعداد سلول‌ها گردد. برای ارزیابی فرض استقلال از شبکه و مقایسه شبکه‌ها فاکتور سرعت محوری در حالت حل پایدار معیار سنجش قرار گرفته که در

¹ Fluent Meshing

² Ansys 16

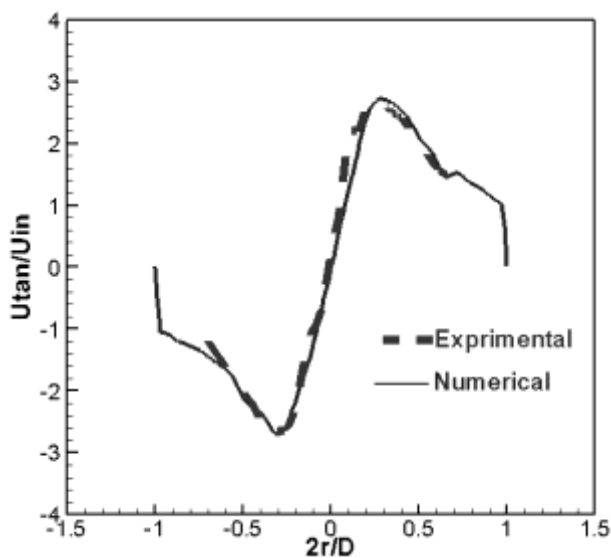


شکل ۵ چگونگی این تغییرات به تصویر کشیده شده است. جدول ۴ نشان می‌دهد که بیشینه اختلاف سرعت بین نتایج شبکه‌ها کمتر از ۵ درصد است که اختلافی قابل قبولی می‌باشد. برای پرهیز از عدم قطعیت و شک در نتایج، محاسبات با استفاده از ۸۲۰۰۰۰ سلول انجام گرفته است.

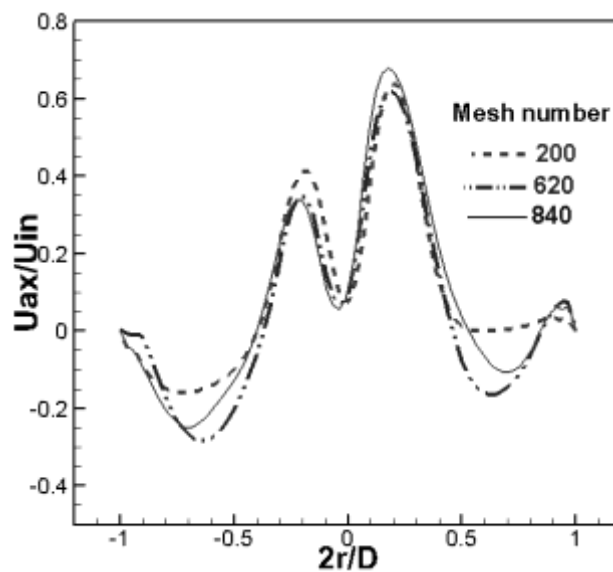
تعداد شبکه	سرعت محوری بر سرعت ورودی ^۱
۲۰۰۰۰۰	۰/۶۲
۶۲۰۰۰۰	۰/۶۳
۸۴۰۰۰۰	۰/۶۶
اختلاف	۴٪

۴-۷. اعتبارسنجی مدل عددی^۲

برای کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی سیکلون در نرم‌افزار فلوئنت، پاسخ‌ها با نتایج پژوهش تجربی گرونالد و همکاران [۳] مقایسه شده است. در این مدل برای رویه گسسته سازی فشار از روش پرستو^۳، کوپل کردن فشار و سرعت از روش سیمپل^۴ و بقیه‌ی گسسته سازی‌ها از روش کوئیک^۵ استفاده شده است. نتایج در قالب شکل ۶ قابل مقایسه بوده و نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی و مدل تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.



شکل ۶. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی



شکل ۵. بررسی استقلال از شبکه

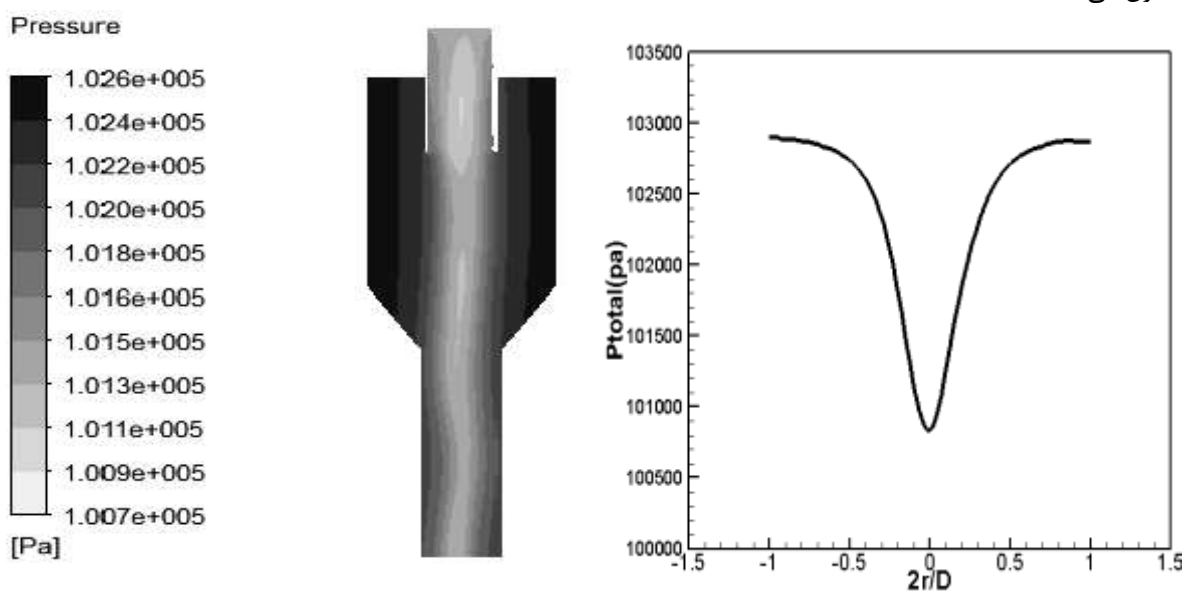
^۱ U_{ax}/U_{in}
^۲ Validation
^۳ PRESTO
^۴ SIMPLE
^۵ QUICK



۴-۸. نتایج حل عددی جریان سیال

افت فشار

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیکلون گازی افت فشار در جریان ورودی می‌باشد. افت فشار در سیکلون ناشی از افت در ورودی و خروجی و همچنین افت انرژی در اثر حرکت چرخشی سیال است. در شکل ۷ نمودار فشار استاتیک در مقطع $Z=130\text{mm}$ نشان داده شده و در شکل ۸ کانتور فشار این حقیقت را بیان می‌دارد که کمترین فشار در هسته مرکزی سیکلون می‌باشد.



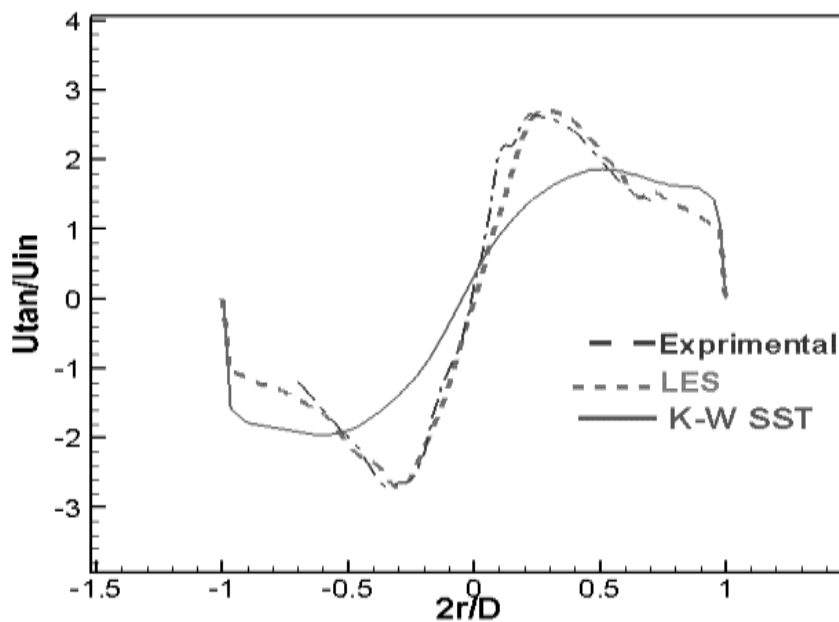
شکل ۸. کانتور فشار

شکل ۷. نمودار فشار

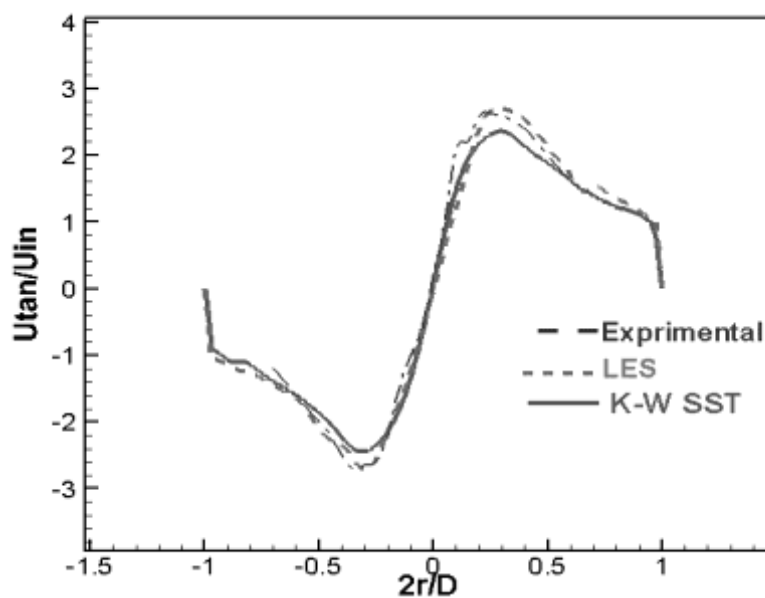
سرعت

به منظور مقایسه شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقطع $Z=130\text{mm}$ از راس سیکلون در دو راستای مماسی و محوری استخراج شده و با نتایج آزمایشگاهی گرونالد و همکاران [۳] مقایسه شده است. نمودار سرعت مماسی جریان در مقطع $Z=130\text{mm}$ بر اساس مدل‌های توربولانس ال-ای-اس و کی-امگا اس‌اس‌تی در حالت ناپایدار با فاصله زمانی $0.01/0.1$ برای ۱ ثانیه در شکل ۹ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل کی-امگا اس‌اس‌تی نسبت به ال-ای-اس در شکل ۹ تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی در تخمین سرعت مماسی ندارد و ضریب دقت پایینی دارد برای اصلاح این روش از ضریب curvature correction در نرم افزار فلونت استفاده می‌شود که مدل کی-امگا اس‌اس‌تی را به روش آر-اس-ام نزدیک می‌نماید که در شکل ۱۰ به نمایش درآورده شده است. سرعت مماسی در سیکلون می‌تواند بصورت یک گردابه رانکین در نظر گرفته شود، یعنی یک گردابه اجباری $U = \omega r$ برای $0 \leq r \leq a$ و یک گردابه آزاد $U = \Omega/r$ برای $r \geq a$. گردابه اجباری در ناحیه مرکزی سیکلون دیده می‌شود.

¹ Forced Vortex
² Free Vortex



شکل ۹. نمودار سرعت مماسی



شکل ۱۰. نمودار سرعت مماسی با curvature correction



نتیجه گیری

مقایسه ال-ای-اس و کی-امگا اس اس تی در حالت ناپایدار

روش ال-ای-اس نسبت به کی-امگا اس اس تی تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. موضوع منطقی در ارتباط با مدل ال-ای-اس این است که اساساً مقیاس‌های بزرگ کمیت‌ها در انتقال قسمت عمده مومنتوم، جرم و انرژی دخالت داشته و در مقایسه با مقیاس‌های کوچک کمیت‌ها به خصوصیات مسئله همچون هندسه و شرایط مرزی حساس‌تر می‌باشد. این نگرش روندی کلی‌تر را جهت ساده‌سازی مدل شبیه‌سازی فراهم می‌کند؛ بنابراین قسمت زیادی از تاثیرات مربوط به تلاطم‌های ناشی از آشفتگی قابل حل می‌گردد. برخلاف فرمول بندی تنش رینولدز، در فرمول بندی مدل ال-ای-اس تنش‌ها در مقیاس زیر شبکه‌ای اطلاعات بیشتری را در بر دارند، در نتیجه مدل‌های ال-ای-اس جریان‌های گردابه را در مقایسه با مدل کی-امگا اس اس تی به شکل بهتر و با ضریب دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار می‌دهند.

فهرست علائم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	$\overline{U_i U_j}$	تانسور تنش رینولدز
U	سرعت (ms^{-1})	μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
T	دما (K)	ρ	چگالی (kgm^{-3})
ϑ_t	لزجت سینماتیکی گردابه (m^2s^{-1})	ε	نرخ اتلاف جریان درهم
ω	سرعت زاویه‌ای (rads^{-1})	tangential	مماسی
Ω	شدت چرخش (m^2s^{-1})	i	مولفه افقی در سیستم مختصات کارتزین
SGS	مقیاس زیر شبکه	j	مولفه قائم در سیستم مختصات کارتزین
axial	محوری		

مراجع

- [1] K. Elsayed, C. Lacor, 2012. "The effect of the dust out let geometry on the performance and hydrodynamics of gas cyclones", *computers & fluids* 68, 134-147.
- [2] Q. Yang, W. LV, L. Ma, H. Wang, 2013. "CFD study on separation enhancement of mini-hydro cyclone by particulate arrangement", *Separation and Purification Technology* 102, 15-25.
- [3] G. Gronaled, J.J. Derksan, 2011. "Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches", *Powder Technology* 205, 160-171.
- [4] Chuah T.G., Gimbin J., 2016. "A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aero cyclones performance and hydrodynamics", *Powder Technology* 162, 126-132.
- [5] Y. Zhang a, Zh. Wangb, Y. Jin b, Zh. Li a, W. Yi a, 2015. "CFD simulation and experiment of residence time distribution in short-contact cyclone reactors", *Advanced Powder Technology* 26, 1134-1142.
- [6] A. Ghasemi, M. Shams, M. M. Heyhat, 2015. *Modeling Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator and Optimizing Effective Geometry Parameters, Modares Mechanical Engineering*, Vol.15, No. 4, pp. 67-75, (In Persian).
- [7] J.O. Hinze. 1975. *Turbulence*. McGraw- Hill Publishing co, New York.
- [8] h. upper S.T. Jayaraju, 2009. *Study of the air flow and aerosol transport in the airway using LES and DES methodology*, Phd.
- [9] Y. Jin, H. Herwig, 2015. Turbulent flow in rough wall channels: Validation of RANS models.



پیوست

Compare K-WSST and LES Turbulence Models in Dehydrating Cyclone

Somayeh Sarkardehie¹, Hamed Houri Jafari²

¹Department of Mechanical Engineering, the Islamic Azad University, West Tehran Branch, Tehran, Iran.
s61_s61@yahoo.com

²Assistant Professor @ Institute for International Energy Studies, Tehran, Iran.
Tehran, Iran, hhjafari@ifco.ir

Abstract. Centrifugal separators act a major role in separating suspended particles within liquids and gases. In this research the numerical simulation of turbulent flow inside dehydrating cyclones using Computational Fluid Dynamics has been done. The aim of this simulation is to compare K-WSST and LES turbulence models in unsteady states. The continuity equation has been discretized applying finite volume method and in order to couple the continuity and momentum equations the simple algorithm introduced by Patenkar has been applied. In this simulation the flow has been assumed as a 3D single phase incompressible viscous flow. The results obtained demonstrate that LES is a suitable approach for modeling the effect of cyclone dimensions on the flow field and performance. Through this research Solid Works has been applied to create the 3D model, Fluent to analyze the flow, CFD Post and also Tec Plot for post-processing.

Keywords: LES, K-WSST, Turbulence Models, Numerical Simulation.