

تخمین قطر ستون هوای مرکزی در یک هیدروسیکلون با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی

محسن کریمی^۱؛ علی دهقانی^{۲*}؛ شهرام طالبی^۳

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، Email: karimimp@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، Email: a.dehghani@yazduni.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، Email: talebi_s@yazduni.ac.ir

(دریافت ۲۴ مرداد ۱۳۸۸، پذیرش ۱۱ مرداد ۱۳۸۹)

چکیده

یک ویژگی جریان در هیدروسیکلون، تشکیل ستون هوای مرکزی است. جریان شدید چرخشی، ناحیه کم فشاری را در مرکز به وجود می آورد که معمولاً به تشکیل سطح آزاد مایع در حال دوران، به شکل استوانه منجر شده و در تمام طول هیدروسیکلون برقرار است. این ستون هوا بر کارایی جدایش تأثیر گذار است. در این پژوهش، برای تخمین قطر ستون هوای مرکزی از نقاط کم فشار در داخل هیدروسیکلون استفاده شده است. به منظور تعیین توزیع فشار در داخل هیدروسیکلون، از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است. از سه مدل جریان آشفته $k-\epsilon$ ، RSM، و LES در غالب نرم افزار Fluent برای تخمین قطر ستون هوای مرکزی استفاده شده است. برای تعیین قطر ستون هوای مرکزی از سه صفحه؛ یک صفحه در قسمت استوانه‌ای و دو صفحه دیگر در بخش مخروطی هیدروسیکلون استفاده شده است. نتایج نشان داده‌اند که؛ مدل $k-\epsilon$ در تخمین کارایی هیدروسیکلون چندان موفقیت آمیز نبوده است. مدل آشفتگی LES در پیش بینی سرعت ها در داخل هیدروسیکلون دقیق بوده است. از بین سه مدل انتخابی، مدل آشفتگی RSM در تخمین قطر ستون هوای مرکزی در مقایسه با دو مدل دیگر دارای دقت بیشتری است.

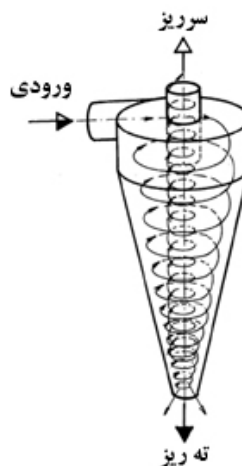
کلمات کلیدی

هیدروسیکلون، دینامیک سیالات محاسباتی، قطر ستون هوای مرکزی

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

جداسازی در هیدروسیکلون، بر مبنای تاثیر نیروهای گریز از مرکز و مقاومت سیال که در بدنه این دستگاه تولید می‌شوند، استوار است. هیدروسیکلون دارای بخش دورانی نیست و جریان چرخشی لازم توسط پمپاژ سیال به صورت مماسی درون بدنه استوانه- مخروطی ساکن تولید می‌شود. به جز در ناحیه ورودی، حرکت سیال در درون هیدروسیکلون تقارن دایره‌ای دارد و به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱: اجزای اصلی هیدروسیکلون و چگونگی عملکرد آن [۱]

ذرات خوراک تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز و مقاومت سیال قرار می‌گیرند. ذرات ریز یا سبک و میزان زیادی آب با کمک ستون هوایی که در بخش مرکزی تشکیل می‌شود، به سمت محور حرکت کرده و از سرریز خارج می‌شوند. ذرات درشت یا چگال به سمت کناره‌ها حرکت می‌کنند و همراه با مقداری آب، از جریان رو به پایین ته‌ریز، خارج می‌شوند [۲].

ویژگی مهم جریان در هیدروسیکلون، تشکیل ستون هوای مرکزی^۱ است. جریان قوی چرخشی، ناحیه کم فشاری را در مرکز به وجود می‌آورد که معمولاً به تشکیل سطح آزاد مایع در حال دوران منجر شده و به شکل استوانه است که در تمام طول سیکلون برقرار است. اگر یکی از خروجی‌ها یا هر دو مستقیماً به هوای بیرون متصل شوند، ستون پر از هوا می‌شود. هرگونه گاز پخش شده یا حتی حل شده موجود در سیال ورودی نیز به این ستون مرکزی وارد می‌شود [۳]. ستون هوای مرکزی در فرآیند جدایش ذرات در داخل هیدروسیکلون اثر بسزایی دارد و در صورتی که این ستون به صورت مناسبی مستقیم بوده و قطر در آن در طول طول سیکلون ثابت باشد بیانگر پایداری جریان

حلقوی است. در نتیجه تخمین صحیح این قطر منجر به بررسی دقیق تر کارایی هیدروسیکلون می‌شود. روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲ می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان در داخل هیدروسیکلون مورد استفاده قرار گیرد. حل عددی معادلات ناویر- استوکس اساس کار در CFD است.

هسیه^۳ و راجامانی^۴، موندرون^۵ و همکاران [۵] و راجامانی و دوولاپالی^۶ [۶]، از مدل طول اختلاط پرانتل برای مدل کردن آشفتگی^۷ در هیدروسیکلون‌هایی با قطرهای ۷۵ و ۲۵۰ میلی‌متر استفاده کرده‌اند. در این تحقیقات ستون هوای مرکزی در نظر گرفته نشده است. دیاکوسکی^۸ و ویلیامز^۹ [۷] نشان داده‌اند که ستون هوای مرکزی در طول هیدروسیکلون ثابت نیست، اما دارای طبیعت نوسانی است. در این کار از ترکیب مدل آشفتگی k-ε و معادله‌ای برای تنش رینولدز استفاده شده است و به بررسی ویژگی‌های ناهمسانگردی آشفتگی در جریان هیدروسیکلون پرداخته شده است. در تحقیقات اخیر ستون هوای مرکزی به صورت یک سطح استوانه‌ای ثابت مدل شده است. راجامانی و دلگادیلو^{۱۰} [۸] به مقایسه مدل‌های آشفتگی در جریان دو فازی هیدروسیکلون پرداخته‌اند. در کار آن‌ها برای تخمین قطر ستون هوای مرکزی از الگوریتم VOF^{۱۱} (الگوریتمی برای تخمین سطح مشترک بین گاز و مایع) استفاده شده است. گوپتا^{۱۲} و همکاران [۹] با حذف ستون هوای مرکزی از طریق وارد کردن یک میله به بررسی ویژگی‌های افت فشار در یک هیدروسیکلون پرداخته‌اند. در برخی از تحقیقات ذکر شده قطر ستون هوا به عنوان یکی از فرضیات مسئله در نظر گرفته شده است. در حالیکه در برخی دیگر، از نقاط کم فشار استفاده نشده است و یا به طور کلی نقش این ستون، از حل مسئله حذف شده است. در مطالعه حاضر اساس تخمین بر مبنای توزیع فشار در داخل هیدروسیکلون است. در این کار از نرم‌افزار FLUENT برای شبیه‌سازی استفاده شده است. این نرم‌افزار با زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده است. به طور کلی مراحل حل یک مسئله در این نرم‌افزار با وارد کردن مش به نرم‌افزار شروع شده، سپس شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل انجام می‌شود، در مرحله بعد خواص مواد و شرایط مرزی تعیین می‌شوند و با مقدار دهی اولیه به میدان جریان انجام محاسبات شروع خواهد شد. و در مرحله آخر نتایج ذخیره می‌شوند.

در پژوهش حاضر، توزیع فشار در یک هیدروسیکلون، با کمک سه مدل آشفتگی k-ε RNG^{۱۳}، RSM^{۱۴} و LES^{۱۵} در نرم‌افزار

$$\tau_{ij}^{Re} = \mu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

که در این رابطه μ_t ویسکوزیته آشفتگی است، که به طور مستقیم با انرژی جنبشی آشفتگی k ، و نرخ اتلاف ε ، مطابق رابطه ۵ مرتبط است:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف از معادلات انتقال زیر تعیین می‌شوند [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_{k\mu_{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \quad (6)$$

$$2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \quad (7)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (2\mu_t S_{ij} S_{ij}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

ثابت‌ها عبارتند از: $C_{1\varepsilon} = 1/42$ ، $C_{2\varepsilon} = 1/68$ ، و $C_\mu = 0.0845$ ، μ_{eff} ویسکوزیته موثر است که توسط رابطه دیفرانسیلی ۸ به دست می‌آید.

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\varepsilon \mu} \right) = 1.72 \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{v}^3 - 1 + C}} dv \quad (8)$$

که در این رابطه $\bar{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$ و C ثابتی برابر ۱۰۰ است. نرخ کرنش میانگین، S_{ij} ، در رابطه ۹ بیان شده است.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

تفاوت اصلی بین مدل RNG k-ε و مدل k-ε وجود قسمت $\frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}$ در رابطه ۷ است. مدل RNG در بیان اثرات کرنش‌های زیاد و انحنای خطوط جریان نسبت به مدل k-ε دقیق‌تر است و همین مسئله این مدل را برای حل مسئله هیدروسیکلون مناسب‌تر می‌نماید.

FLUENT تعیین شده است. به منظور تخمین قطر ستون هوای مرکزی از نقاط کم فشار استفاده شده است. نتایج حاصل با نتایج کارهای تجربی که از منبع [۱۰] استخراج شده، اعتبار سنجی شده است.

۲- معادلات حاکم

به منظور مدل کردن جریان سیال در هر سیستمی، به دست آوردن معادلات حاکم بر آن سیستم مورد نیاز است. موازنه جرم و موازنه گشتاور قسمت‌های اصلی این مدل سازی است. به علاوه، مدل‌هایی که برای ارزیابی آشفتگی به کار می‌روند. با فرض سیال تراکم‌ناپذیر، معادلات حاکم متوسط-گیری شده و به صورت زیر خواهند شد:

$$u = \langle u \rangle + u' \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \langle \rho \langle u_i \rangle \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \rangle}{\partial x_j} = - \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^{Re}) + \rho g_i$$

در روابط بالا $\langle u \rangle$ معرف سرعت متوسط، u' مولفه نوسانی سرعت، ρ دانسیته سیال، P فشار، μ ویسکوزیته سیال و τ_{ij}^{Re} معرف تنش‌های رینولدز است که به کمک معادلات آشفتگی تعیین خواهند شد [۸].

۲-۱- مدل‌های آشفتگی

مدل‌های آشفتگی مختلفی برای بیان جمله تنش‌های رینولدز، τ_{ij}^{Re} وجود دارد. در این مقاله از بین مدل‌های آشفتگی موجود، مدل، RNG k-ε مدل تنش رینولدز (RSM) و مدل شبیه سازی گرداب بزرگ (LES) برای حل مسئله هیدروسیکلون به کار برده شده است.

۲-۱-۱- مدل RNG k-ε

مدل RNG k-ε در ساختار شبیه مدل k-ε بوده، اما دارای اجزای اضافی برای ارزیابی بهتر نرخ اتلاف، ε ، است. این مسئله باعث بهبود عملکرد این مدل در جریان‌هایی با شدت برش زیاد شده است. در مدل RNG k-ε جمله τ_{ij}^{Re} به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

RSM مدل ۲-۱-۲

در مدل تنش رینولدز (RSM) معادلات انتقال برای هر یک از مولفه‌های تنش رینولدز حل می‌شوند. معادله انتقال در رابطه ۱۰ نشان داده شده است [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \langle u'_i u'_j \rangle) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \langle u'_i u'_j \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_k} \right) - \rho \left(\langle u'_i u'_k \rangle \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} + \langle u'_i u'_k \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \right) - \rho \varepsilon \quad (10)$$

LES مدل ۳-۱-۲

در مدل شبیه‌سازی گرداب بزرگ (LES)، حرکت گرداب‌های بزرگ حل شده و گرداب‌های کوچک مدل می‌شوند. سرعت $u(x, t)$ ، با کمک یک عملگر فیلترینگ به صورت مجموع دو جزء حل شده (مقیاس‌های بزرگ) $\bar{u}(x, t)$ و باقیمانده (مقیاس‌های کوچک) $u'(x, t)$ تقسیم می‌شود. نتیجه عملگر فیلترینگ بر معادلات ناویر-استوکس در رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j} + g_i \quad (12)$$

این معادلات شامل تانسور تنش باقیمانده τ_{ij}^{sgs} است؛ که شامل تمام اطلاعات مقیاس‌های کوچک و باقیمانده‌ها است و به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\tau_{ij}^{sgs} \equiv -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

مدل استاندارد برای μ_t توسط اسماگرنسکی [۱۱] پیشنهاد شده که ویسکوزیته گرداب را به عرض فیلترینگ مرتبط می‌کند. ولی با این حال تاثیرات ویسکوزیته مولکولی را شامل نمی‌شود. ویسکوزیته آشفتگی به صورت اختلاف بین ویسکوزیته موثر و ویسکوزیته مولکولی بیان می‌شود.

$$\mu_t = \mu_{eff} - \mu \quad (14)$$

ویسکوزیته موثر با روابط ۱۵ تا ۱۷ بیان می‌شود:

$$\mu_{eff} = \mu [1 + H(x)]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

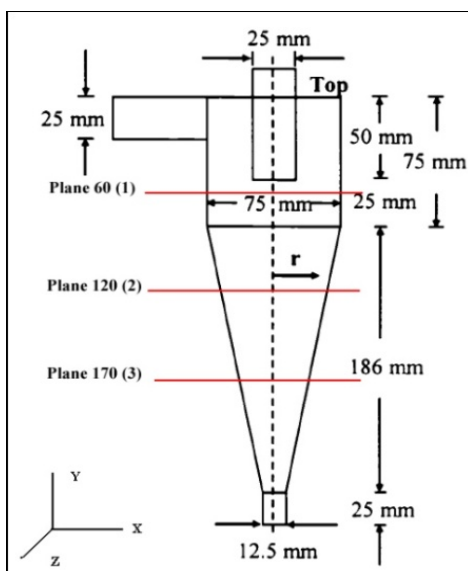
$$x = \frac{\mu_s^2 \mu_{eff}}{\mu^3} - C \quad (16)$$

$$\mu_s = \left(C_{RNG} V^{\frac{1}{3}} \right)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (17)$$

که در این روابط C برابر ۱۰۰، V حجم سلول محاسباتی و تابع H(x) تابع Heaviside است. زمانی که نسبت $\frac{\mu_s^2 \mu_{eff}}{\mu^3}$ کمتر از C باشد، رفتار جریان مشابه جریان آرام است و ویسکوزیته آشفتگی برابر صفر می‌شود. زمانی که $\frac{\mu_s^2 \mu_{eff}}{\mu^3}$ بزرگتر از C باشد، جریان آشفتگی است.

۳- نتایج

شکل ۲ هندسه و ابعاد واقعی هیدروسیکلون بررسی شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق با این ابعاد نیز هیدروسیکلونی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده است. همانگونه که از شکل مشخص است، قطر این هیدروسیکلون ۳ اینچ است. صفحات انتخابی به ترتیب در فاصله‌های ۶۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ میلی‌متری از بالای هیدروسیکلون انتخاب شده‌اند.



شکل ۲: ابعاد هیدروسیکلون

در شکل ۳ نمونه‌ای از شبکه‌بندی استفاده شده در این پژوهش به تصویر کشیده شده است. در ایجاد این شبکه از نرم افزار Gambit استفاده شده است. المان های مکعبی در نواحی مختلف هندسه سیکلون شامل، سرریز، ته ریز و دو قسمت استوانه ای و مخروطی به کار برده شده است. همچنین برای دستیابی به دقت بیشتر از تکنیک تولید شبکه سازمان یافته برای تولید مش های مختلف استفاده شده است.

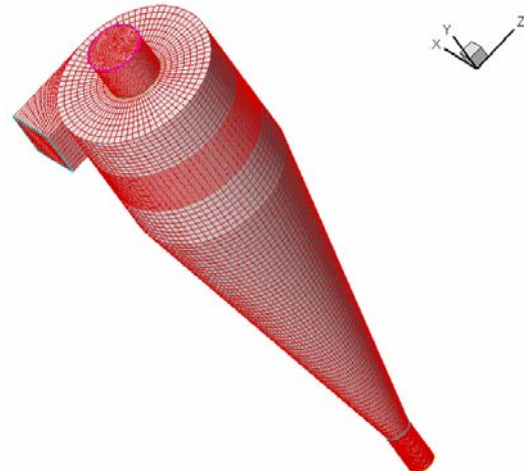
در این مقاله شرایط مرزی در مقطع ورودی به صورت سرعت معلوم و در مقطع خروجی به صورت فشار معلوم در نظر گرفته شده است. در دیواره شرط عدم لغزش اعمال شده است. سیال عامل آب با چگالی $998/2 \text{ Kg/m}^3$ و ویسکوزیته $0/001003 \text{ Kg/m.s}$ در نظر گرفته شده است. برای کوپل بین سرعت و فشار از الگوریتم Simple استفاده شده و روش PRESTO برای میانمایی فشار بکار رفته است [۱۲].

۳-۲- تخمین قطر ستون هوای مرکزی

ورودی مماسی هیدروسیکلون، باعث ایجاد جریان چرخشی سیال در آن می‌شود. این پدیده باعث ایجاد ناحیه کم فشاری در داخل هیدروسیکلون شده، که این مسئله باعث بوجود آمدن یک ستون هوا در داخل هیدروسیکلون می‌شود. در تشکیل ستون هوای مرکزی، توجه به شکل آن بسیار مهم است. زیرا این مسئله تاثیر مستقیمی بر تخمین تقسیم جریان بین سرریز و ته‌ریز دارد. با توجه به اینکه در این پژوهش جریان به صورت یک فازی حل شده است، می‌توان با در نظر گرفتن نقاطی که در آن‌ها فشار بسیار کم است، به تخمین قطر ستون هوای مرکزی پرداخت. به منظور تعیین توزیع فشار در داخل هیدروسیکلون، از سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$, RSM, RNG و LES استفاده شده است. در شکل ۸ کانتورهای فشار برای سه مدل آشفتگی رسم شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که در مدل $k-\epsilon$ RNG این ناحیه کم فشار در قسمت‌های مخروطی هیدروسیکلون تشکیل نشده است و این مدل قادر به پیش‌بینی قطر ستون هوای مرکزی نیست. در دو مدل RSM و LES این نواحی کم فشار در طول هیدروسیکلون تشکیل شده و قطر این ناحیه نیز تا قبل از رسیدن به سرریز هیدروسیکلون تقریباً ثابت است.

برای پیش بینی قطر ستون هوای مرکزی علاوه بر صفحات ۱ و ۲ صفحه‌ای در فاصله 170 mm از بالای هیدروسیکلون (صفحه ۳) نیز در نظر گرفته شده است تا وضعیت ستون هوا در قسمت‌های پایینی بخش مخروطی هیدروسیکلون نیز مشخص شود. نتایج حاصل از پیش‌بینی قطر ستون هوای مرکزی با سه مدل آشفتگی در جدول ۱ نشان داده شده است. همسیه [۱۰]

در شکل ۳ نمونه‌ای از شبکه‌بندی استفاده شده در این پژوهش به تصویر کشیده شده است. در ایجاد این شبکه از نرم افزار Gambit استفاده شده است. المان های مکعبی در نواحی مختلف هندسه سیکلون شامل، سرریز، ته ریز و دو قسمت استوانه ای و مخروطی به کار برده شده است. همچنین برای دستیابی به دقت بیشتر از تکنیک تولید شبکه سازمان یافته برای تولید مش های مختلف استفاده شده است.



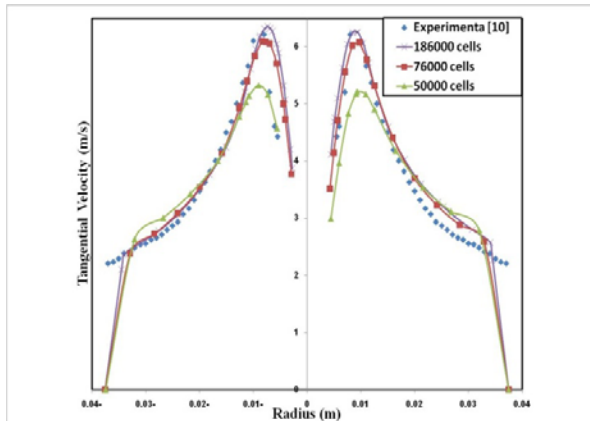
شکل ۳: نمونه‌ای از ساختار شبکه بندی شده

۳-۱- مطالعه شبکه و شرایط حل

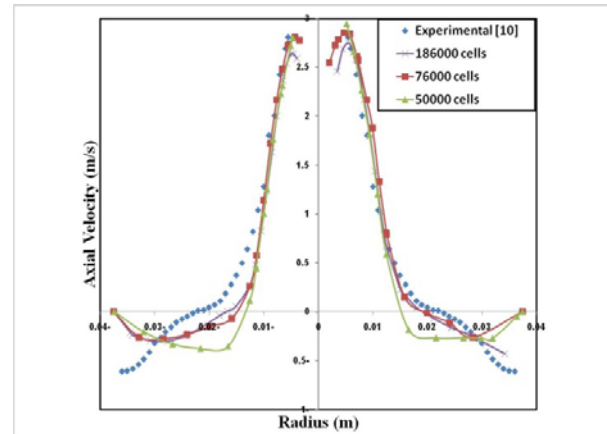
برای حصول اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده مستقل از اندازه شبکه باشد، نیاز به بررسی شبکه است. برای این منظور، جریان داخل هیدروسیکلون به صورت غیردائم، با سه شبکه‌بندی مختلف که به ترتیب شامل 5000 ، 76000 و 186000 سلول است، مدل شده است. برای مطالعه شبکه از مدل آشفتگی RSM استفاده شده است. با توجه به پایداری و دقت در حل مسئله، گام زمانی $0/00005$ ثانیه انتخاب و شبیه سازی برای مدت زمان ۱ ثانیه (تعداد تکرارها 20000) پس از ورود سیال انجام شده است. برای مطالعه شبکه از سرعت مماسی و محوری در مقاطعی در فاصله‌های 60 و 120 میلی‌متری از بالای هیدروسیکلون (صفحه‌های ۱ و ۲) استفاده شده است و نتایج، با داده‌های تجربی [۱۰] اعتبار سنجی شده‌اند. در شکل‌های ۴ تا ۷ نمودارهای سرعت محوری و مماسی در صفحات ۱ و ۲ برای هیدروسیکلون‌هایی با تعداد سلول‌های 5000 ، 76000 و 186000 نشان داده شده است. همانگونه که از شکل‌ها مشخص است، تفاوت چندانی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای شبکه‌های شامل 76000 و

ستون هوای مرکزی در تمام هیدروسیکلون با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد و این مدل در تعیین توزیع فشار و در نتیجه تخمین قطر ستون هوای مرکزی کارایی بالایی دارد. در استفاده از مدل LES با اینکه ناحیه کم فشار در طول هیدروسیکلون ایجاد شده، ولی میزان خطا در تخمین قطر ستون هوای مرکزی زیاد است.

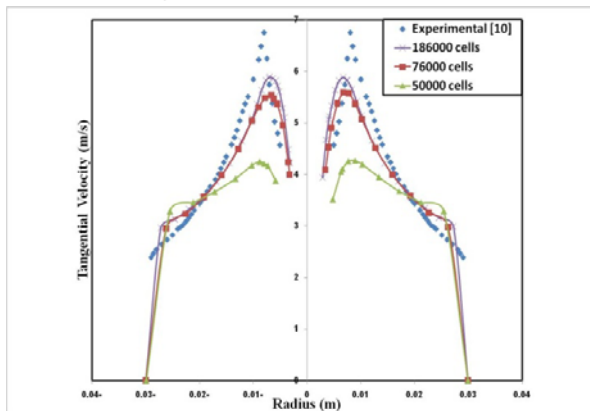
ستون هوا را در طول هیدروسیکلون ثابت در نظر گرفته و میزان قطر آن را $0/01$ متر گزارش کرده است. با توجه به جدول ۱ و همچنین کانتورهای فشار مشخص است که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ قادر به پیش‌بینی ستون هوای مرکزی نیست. تنها در قسمت لوله پیدا کننده گرداب ناحیه کم فشاری ایجاد شده است. در استفاده از مدل RSM پیش‌بینی قطر



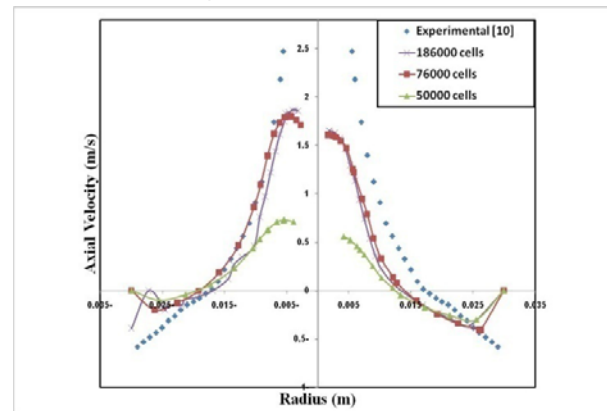
شکل ۵: توزیع مولفه مماسی سرعت در صفحه ۱ برای سه مقدار مختلف تعداد سلول‌های محاسباتی



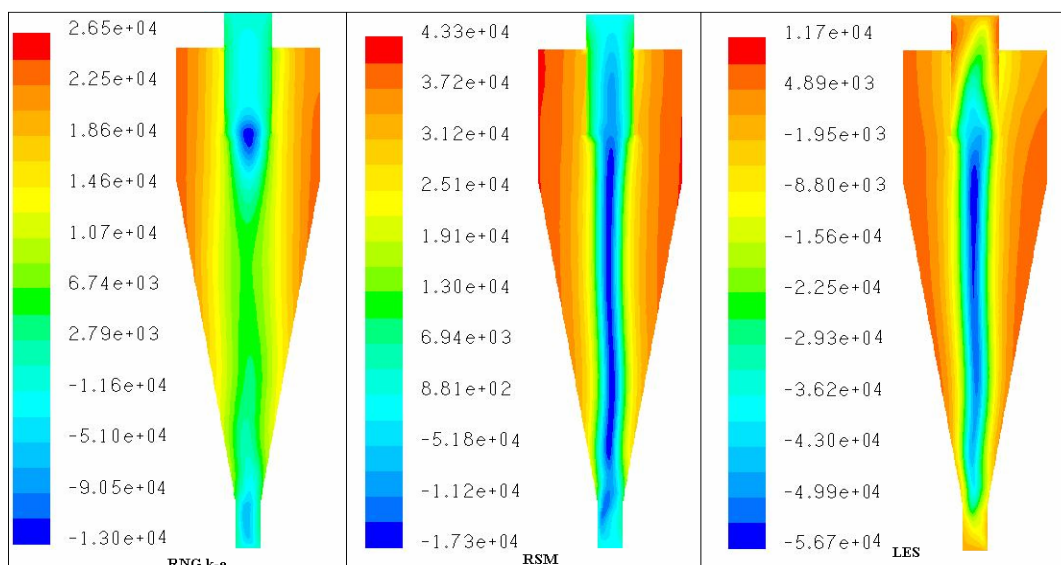
شکل ۴: توزیع مولفه محوری سرعت در صفحه ۱ برای سه مقدار مختلف تعداد سلول‌های محاسباتی



شکل ۷: توزیع مولفه مماسی سرعت در صفحه ۲ برای سه مقدار مختلف تعداد سلول‌های محاسباتی



شکل ۶: توزیع مولفه محوری سرعت در صفحه ۲ برای سه مقدار مختلف تعداد سلول‌های محاسباتی



شکل ۸. کانتورهای فشار در هیدروسیکلون برای سه مدل آشفتگی

جدول ۱: نتایج پیش‌بینی قطر ستون هوای مرکزی با سه مدل آشفتگی

پیش‌بینی شده			قطر ستون هوای مرکزی (m)
صفحه ۳	صفحه ۲	صفحه ۱	
۰	۰	۰/۰۱۳	RNG k-ε
۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	RSM
۰/۰۲۹	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶	LES

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، قطر ستون هوای مرکزی در یک هیدروسیکلون با استفاده از نقاطی با فشار بسیار کم تخمین زده شده است. بدین منظور از سه مدل آشفتگی RNG k-ε، RSM و LES در غالب نرم افزار Fluent استفاده شده است. نتایج حاصل از این کار نشان می‌دهد که دو مدل RNG k-ε و LES در تخمین ستون هوای مرکزی چندان موفق نبوده‌اند؛ در حالیکه مدل RSM در هر سه منطقه مورد بررسی (صفحه های ۱، ۲ و ۳ شکل ۲) قطر ستون هوا را به ترتیب ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۹ و ۰/۰۰۸ متر پیش‌بینی کرده است که در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی آن ۰/۰۱ متر نتیجه قابل اعتمادی است.

منابع

- [2] Wills, Barry A.; 1997; "Mineral Processing Technology, An Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral processing", Butterworth Heinemann.
- [3] Bradley, D.; 1965; "The Hydrocyclone" London Pergamon Press.
- [4] Hesih, K.T.; Rajamani, R.K.; 1988; "Phenomenological model of hydrocyclone: model development and verification for single phase flow", Journal of Minerla Processing, Vol. 22, pp. 223-237.
- [5] Monderdon, T.C.; Hsieh K.T.; Rajamani R.K.; 1992; "Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimention", International Journal of Mineral Processing, Vol 35, pp. 65-83.
- [6] Rajamani R.K.; Devulapalli B.; 1994; "Hydrodynamics modelling of swirling flow and particle classification in large scale hydrocyclone", KONA Powder and Particle, Vol. 1, pp. 95-103.

- [1] Bergstrom, J.; 2006; "Flow Field and Fibre Fraction Studies in Hydrocyclones", Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology.

- [10] Hsieh, K.T.; 1988; "*A phenomenological model of the hydrocyclone*", Ph.D. thesis, University of Utah.
- [11] Smagorinsky, J.; 1963; "*General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiments*". Monthly Weather Review 91, pp. 99-164.
- [12] Fluent In0c; 2009; "*Fluent 6.3 Documentation*", <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/index.htm>
- [7] Dyakowski T.; Williams R.A.; 1995; "*Prediction of air-core size and shape in a hydrocyclone*", International Journal of Mineral Processing, Vol. 43, pp. 1-14.
- [8] Delgadillo, Jose A.; Rajamani, R.K.; 2005; "*A Comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem*", Utah Int. J. Miner. Process, Elsevier, Vol 77, pp-217-230.
- [9] Gupta, R.; Kaulaskar, M.D.; Kumar, V.; Sripriya, R.; Meikap, B.C.; Chakraborty, S.; 2008; "*Studies on the understanding mechanism of air core and vortex formation in a hydrocyclone*", Chemical Engineering Journal, Vol. 144, pp. 153-166.

پی‌نوشت

-
- ¹ Air Core
² Computational Fluid Dynamics
³ Hsieh
⁴ Rajamani
⁵ Monderon
⁶ Devulapalli
⁷ Turbulence
⁸ Dyakowski
⁹ Williams
¹⁰ Delgadillo
¹¹ Volume of Fluid
¹² Gupta
¹³ Renormalization group k-ε
¹⁴ Reynolds stress model
¹⁵ Large eddy simulation