

# بررسی هیدرودینامیک سانتریفیوژ گازی با استفاده از تحلیل CFD

محمد رضا محمدی جوزانی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

یعقوب بهجت\*<sup>+</sup>

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت ایران، پژوهشکده توسعه فرایند و فناوری تجهیزات

شاهرخ شاه حسینی، احد قائمی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

**چکیده:** با توجه به کاربرد سانتریفیوژها برای حذف آلاینده‌های گازی، دانش و شناخت دقیقی از رفتار جریان درون یک سانتریفیوژ، اهمیت و ضرورت زیادی برای طراحی و بهینه‌سازی عملکرد آن دارد. در این پژوهش، هیدرودینامیک و انتقال گرمای سانتریفیوژ گازی در حالت ناپایا، سه بعدی و با فرض تراکم‌پذیری سیال با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی شده است. با توجه به چرخش دیواره خارجی سانتریفیوژ با سرعت بالا، دیدگاه چند قاب مرجع چرخان (MRF) با به‌کارگیری مدل درهمی  $RNG\ k-\epsilon$  و  $RSM$  در مدل محاسباتی استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده از مدل محاسباتی شامل توزیع فشار، سرعت، دما و الگوی جریانی حرکت سیال در سانتریفیوژ گازی می‌باشد. مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی CFD با استفاده از دو مدل اغتشاش  $RNG\ k-\epsilon$  و  $RSM$  نشان می‌دهد که اختلاف ناچیزی بین سرعت و فشار شعاعی سیال وجود دارد بنابراین با توجه به هزینه محاسباتی بالای مدل درهمی  $RSM$ ، مدل درهمی  $RNG\ k-\epsilon$  برای بررسی ویژگی‌های جریان درهم در سانتریفیوژ گازی مناسب می‌باشد. نتیجه‌های به دست آمده از مدل محاسباتی نشان می‌دهد که چرخش سیال در سانتریفیوژ، جریان خوراک ورودی و همچنین وجود مجراهای خروج جریان از بالا و پایین، ساختار جریان و حرکت محوری سیال در سانتریفیوژ گازی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** سانتریفیوژ گازی، شبیه‌سازی CFD، هیدرودینامیک، دیدگاه قاب مرجع چرخان.

**KEY WORDS:** Gas centrifuge, CFD simulation, Hydrodynamic, Multiple Rotating Reference Frame (MRF).

+E-mail: behjaty@ripi.ir

\*عهده دار مکاتبات

## مقدمه

بیش از ۸۰ سال است که در دنیا، جداسازی با استفاده از سانتریفیوژ گازی با توجه به اختلاف جرم مولکولی گونه‌های شیمیایی آغاز شده است. از سوی دیگر با توجه به اختلاف جرم مولکولی، سانتریفیوژ گازی یک روش بسیار مناسب برای جداسازی ایزوتوپی است و بیش از نیم سده است که از این روش برای غنی‌سازی اورانیوم استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از سانتریفیوژ گازی برای حذف آلاینده‌های گازی مانند  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  از جریان گاز طبیعی آغاز شده است [۱]. بیشتر، فرایندهای آمینی برای حذف  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  از گاز طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی استفاده از فرایندهای آمینی دارای مصرف انرژی زیادی می‌باشند. عیب دوم فرایندهای آمینی، گازهای پسماند تولید شده در فشار جو است که منجر به صرف هزینه‌ی زیاد برای متراکم کردن آن‌ها برای تزریق دوبار می‌شود [۲، ۱]. با توجه به عیب‌های گفته شده برای استفاده از فرایندهای آمینی، گرایش به استفاده از فرایند سانتریفیوژ گازی برای حذف آلاینده‌های گازی شدت پیدا کرده است.

دانش و شناخت توزیع سرعت درون سانتریفیوژ گازی اهمیت و ضرورت زیادی برای طراحی و تحلیل عملکرد این تجهیز دارد، زیرا حرکت جریان گاز در یک سیلندر که با سرعت بالایی می‌چرخد، هیدرودینامیک و الگوی جریانی پیچیده‌ای را به وجود می‌آورد. با وجود کاربردهای گسترده سانتریفیوژ گازی، هیدرودینامیک سانتریفیوژها هنوز به طور دقیق و جزئی مشخص نشده است. این امر به طور عمده به خاطر دو علت است: اول این که حرکت گاز به صورت سه بعدی است و دانسیته در راستای شعاعی به طور چشمگیری تغییر می‌کند. به طوری که تحلیل یک بعدی و دو بعدی نمی‌تواند حتی به عنوان یک تقریب، حل معتبری را ارائه دهد. دوم آنکه، تلاش برای دیدن تجربی توزیع سرعت واقعی، در کل سانتریفیوژ محکوم به شکست است زیرا دستگاه مناسبی که میدان جریان چرخشی را توزیع کند، وجود ندارد.

از آنجایی که برای تخمین قدرت جداسازی یک سانتریفیوژ، اطلاع از الگوی جریان گاز لازم است، پژوهشگران مطالعاتی را روی دینامیک جریان گاز در استوانه‌ی چرخنده انجام دادند که در صدر آنها پژوهش راجع به مکانیزم سیال در حال چرخش به کمک

روش‌های عددی پیشرفته بود.

در گذشته حل‌های تحلیلی برای معادله‌های دیفرانسیلی حاکم، تنها به صورت تقریبی به دست می‌آمد، که چشمگیرترین کار در این حوزه، توسط کوهن<sup>(۱)</sup> انجام شده است [۳]. این پژوهشگر جریان گاز را به طور کامل موازی با محور چرخش فرض کرد، یعنی از مؤلفه سرعت شعاعی صرف نظر کرد. همچنین به خاطر حل تقریبی معادل نفوذ، نتیجه‌ها تنها یک توزیع یک‌بعدی از غلظت مولی را ارائه می‌داد. کلوتمن و جنتری<sup>(۲)</sup> در سال ۱۹۸۳ میلادی [۴]، با روش تفاضل محدود، جریان ناهموسی تقارن محوری در یک سانتریفیوژ گازی را شبیه‌سازی کردند. آنها معادله‌هایی را به صورت کاملاً غیر خطی در مختصات استوانه‌ای با فرض تقارن محوری حل کردند. در سال ۱۹۸۹ میلادی، پارک و هیون<sup>(۳)</sup> [۵]، مطالعه‌های خود را روی جریان گاز درون یک محفظه‌ی استوانه‌ای که با سرعت بالا می‌چرخد معطوف کردند و حل‌های عددی را برای معادله‌های ناویر - استوکس در حالت سیال تراکم‌پذیر جستجو کردند. آنها نتیجه‌های عددی خود را در مورد سرعت‌های محوری و شعاعی با پیش‌بینی‌های نظری انجام شده مقایسه کردند. همچنین تأثیر اندازه‌های سانتریفیوژ بر روی سرعت‌های محوری در ارتفاع‌های گوناگون بررسی شد. هارادا<sup>(۴)</sup> در سال ۱۹۸۰ میلادی [۶]، یک مدل عددی مؤثر را برای حل‌های ناویراستوکس بررسی کرد. در سال ۱۹۸۵ میلادی نیز آنگوریش و اسرائیلی<sup>(۵)</sup> [۷]، حل‌های عددی معادله‌های ناویراستوکس را در حالت پایدار برای کشف اثرهای غیرخطی ارائه کردند.

کامی و هاسگاوا<sup>(۶)</sup> در سال ۲۰۰۰ میلادی [۸]، روی جداسازی گوگرد هگزافلورید در سانتریفیوژ گازی کار کردند. آنها معادله‌های حاکم بر جریان را برای یک سیال تراکم‌پذیر، به وسیله کد کامپیوتری حل کردند. با بررسی نتیجه‌های خطوط جریان به دست آمده دیده شد که خطوط جریان به خاطر وجود صفحه بافل از هم جدا می‌شوند و بخشی از جریان گاز به طرف مجرای خروج فرآورده جریان می‌یابد و بخش باقیمانده جریان که در طول صفحه بافل در جریان است به وسیله دیواره سیلندر به طرف پایین منحرف می‌شود و سرانجام به وسیله مجرای خروج پسماند استخراج می‌شود. نتیجه‌های پژوهش آنها نشان داد که یک الگوی پیچیده جریان، در منطقه جانبی بخاطر گرداندن دما روی دیواره جانبی ایجاد می‌شود.

(۱) Cohen

(۲) Cloutman and Gentry

(۳) Park and Hyun

(۴) Harada

(۵) Ungurish and Israeli

(۶) Hasegawa

**معادله‌ها در قاب مرجع ساکن**

معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای جریان گاز در قاب مرجع ساکن به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} \quad (2)$$

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T \right) = -\nabla \cdot q \quad (3)$$

که P، فشار استاتیک،  $\bar{\tau}$ ، تنسور تنش و  $\rho \bar{g}$  نیروی گرانشی می‌باشد.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} \bar{I} \right] \quad (4)$$

**معادله‌ها در قاب جریان‌های چرخشی و دورانی<sup>(۵)</sup>**

در بسیاری از جریان‌های مهم مهندسی مانند توربو ماشین‌ها، مخزن‌های اختلاط و سانتریفیوژ گازی با جریان چرخشی یا دورانی روبه رو می‌شویم. معادله‌ها به طور پیش فرض در مختصات ساکن (یا ایستا) حل می‌شوند ولی برخی زمان‌ها مفید است که معادله‌ها در مختصات در حال حرکت حل شوند. در بیشتر موردها وقتی که از مختصات ساکن به قسمت‌های در حال حرکت نگاه می‌کنیم، این ناحیه‌ها مسئله‌های ناپایدار را ارایه می‌دهند. ولی با انتخاب یک قاب مرجع متحرک اطراف قسمت‌های در حال حرکت می‌توان مانند مسئله‌های پایدار با این‌گونه مسائل برخورد کرد. برای مسئله‌های ساده، اگر هیچ ناحیه ساکنی نداشته باشیم می‌توان از قاب چرخان منفرد<sup>(۶)</sup> (SRF) استفاده کرد. برای هندسه‌های پیچیده‌تر این احتمال که از SRF استفاده شود ممکن نیست در این موردها مسئله به چندین ناحیه محاسباتی تقسیم می‌شود و در این حالت دو روش زیر به کار گرفته می‌شود.

• چند قاب مرجع چرخان (MRF)<sup>(۷)</sup>

• مدل صفحه‌های اختلاطی (MPM)<sup>(۸)</sup>

دیدگاه مدل صفحه‌های اختلاطی (MPM) با وجود کامل‌تر بودن و در نظر گرفتن برهمکنش‌های بین ناحیه‌های ثابت و متحرک، زمان محاسباتی بالایی را می‌طلبد.

دانگ‌جون و زنگ‌شی<sup>(۱)</sup> در سال ۲۰۰۶ میلادی [۹]، روی شبیه‌سازی میدان جریان سه بعدی یک سانتریفیوژ گازی پژوهش کردند، آنها از روش حجم محدود، برای حل معادله‌های سه‌بعدی استفاده کردند. بررسی میدان جریان در نتیجه‌های شبیه‌سازی بیانگر این است که در پشت مجرای خروج پسماند، جریان گاز راستای حرکت خود را تغییر می‌دهد و در امتداد دیواره اسکوپ به طور خطی حرکت می‌کند که این پدیده عامل ایجاد جریان ناهمسو می‌باشد. همچنین آنها دیدند که بین انتهای مجرای خروج و دیواره‌ی چرخان<sup>(۲)</sup> سانتریفیوژ، تعدادی شوک و تکان ایجاد می‌شود که از تأثیرهای دیواره چرخان می‌باشد که باعث افزایش فشار در آن ناحیه می‌شود و این عامل به هم خوردن تعادل و توازن گرادیان فشار و نیروی سانتریفیوژی است.

استفاده از شبیه‌سازی CFD ابزار جدیدی برای پیش بینی دینامیک سیال و پدیده‌های انتقال فرایندهای پیچیده می‌باشد، به ویژه در موردهایی که پیش بینی رفتار جریان به وسیله فناوری‌های آزمایشگاهی مشکل و پرهزینه باشد. با بهبود روش‌های عددی و پیشرفت فناوری سخت افزاری، زمان مورد نیاز برای انجام مدل‌سازی CFD کاهش یافته است. بنابراین با یک‌بار اعتبارسنجی، مدل CFD توسعه داده شده می‌تواند برای تحلیل حساسیت به خاطر انعطاف‌پذیری در تغییر پارامترها استفاده شود. از سوی دیگر با بررسی پژوهش‌های اخیر، خلأهای موجود در شناسایی رفتار جریان در سانتریفیوژ به همراه در نظرگیری اثر بافل‌ها و اسکوپ‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین در این پژوهش برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر رفتار جریان و تأثیر شرایط عملیاتی و هندسی بر روی هیدرودینامیک سانتریفیوژ گازی با استفاده از مدل CFD مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**بخش نظری****مدلسازی CFD و معادله‌های حاکم**

در این قسمت ابتدا معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت در قاب مرجع ساکن<sup>(۳)</sup> ارایه می‌شود و در ادامه مدل‌های موجود و استفاده شده برای نواحی متحرک و دورانی تشریح می‌شود و معادله‌های حاکم در قاب مرجع چرخان<sup>(۴)</sup> و مدل‌سازی اغتشاش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

(۱) Glombok and Bill

(۲) Rotor

(۳) Inertial reference frame

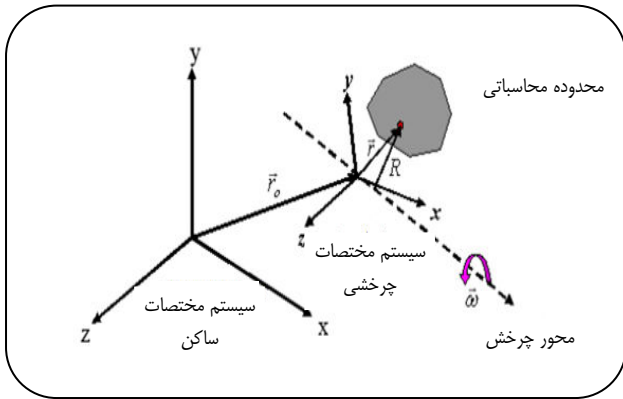
(۴) Rotating reference frame

(۵) Swirling and rotating flows

(۶) Single rotating reference frame

(۷) Multiple rotating reference frame

(۸) Mixing plane model



شکل ۱- قاب‌های مرجع چرخان و ساکن [۲۶].

با توجه به قدرتمندی، اقتصادی بودن محاسبه‌ها و داشتن دقت قابل قبول مدل  $k-\epsilon$  در بازه وسیعی از جریان‌های درهم، از این مدل برای شناسایی ویژگی‌های جریان درهم در سانتریفیوژ گازی استفاده شده است. همچنین با توسعه این مدل و اضافه کردن جمله‌های اضافی به معادله  $\epsilon$  در مدل  $k-\epsilon$  RNG، دقت بهتر و قابل اطمینان‌تری در جریان‌های چرخشی و به سرعت کرنش یافته به دست می‌آید. پارامترهای اغتشاش هیدرودینامیک مطابق مدل  $k-\epsilon$  از معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{2\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon$$

که در معادله‌های بالا  $G_k$ ، تولید انرژی سینتیک اغتشاش به واسطه گرادیان‌های سرعت متوسط و  $G_b$  تولید انرژی سینتیک اغتشاش به واسطه خاصیت شناوری و  $Y_M$  سهم انبساط آشفستگی در اغتشاش تراکم‌پذیر برای نرخ اتلاف کلی است.  $\alpha_k$  و  $\alpha_\epsilon$  به ترتیب اعداد پراوتل مؤثر معکوس برای  $k$  و  $\epsilon$  است.

مدل تنش رینولدز (RSM) برای تعیین تنش‌های رینولدز از حل معادله‌های انتقالی و برای محاسبه نرخ اتلاف ( $\epsilon$ ) از یک معادله اضافی دیگر استفاده می‌کند. یعنی در جریان‌های دو بعدی ۵ و در جریان‌های سه بعدی، هفت معادله به صورت توأم حل می‌کند.

(۱) Swirl Velocity

در این کار از دیدگاه MRF استفاده شده است، زیرا با وجود زمان محاسباتی بسیار پایین، دارای دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی سانتریفیوژ گازی است. ناحیه جانبی نزدیک دیواره‌ی چرخان، ناحیه متحرک فرض شده و سایر نواحی آن، ساکن هستند. بنابراین با استفاده از دیدگاه MRF، معادله‌های حاکم بر جریان سیال در ناحیه دورانی سانتریفیوژ و ناحیه‌های ساکن جداگانه حل شده و اثر مرزی بین ناحیه‌های ساکن و متحرک دیده می‌شود. پس در ادامه کمی جزئی‌تر این دیدگاه بررسی شده و معادله‌های حاکم در نواحی متحرک بیان می‌شود. یک سامانه مختصات که با سرعت زاویه‌ای  $\bar{\omega}$  نسبت به یک قاب مرجع ساکن به طور پیوسته می‌چرخد، در شکل ۱ نشان داده شده است. محور چرخش به وسیله بردار واحد (برداریکه)  $\hat{a}$  تعریف شده است:

$$\bar{\omega} = \omega \hat{a} \quad \bar{v}_r = \bar{v} - \bar{u}_r \quad \bar{u}_r = \bar{\omega} \times \bar{r} \quad (5)$$

با استفاده از معادله‌های زیر سرعت‌های سیال از قاب مرجع ساکن به قاب مرجع چرخان تبدیل می‌شوند. که  $\bar{v}_r$ ، سرعت نسبی (سرعت دیده شده از قاب چرخان) و  $\bar{v}$ ، سرعت مطلق (سرعت دیده شده در قاب ساکن) و  $\bar{u}_r$ ، سرعت چرخش<sup>(۱)</sup> (سرعت به سبب قاب متحرک) می‌باشند.

معادله بقای جرم و اندازه حرکت در یک قاب مرجع چرخان بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{v}_r = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r \bar{v}_r) + \quad (7)$$

$$\rho(\bar{\omega} \times \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \bar{F}$$

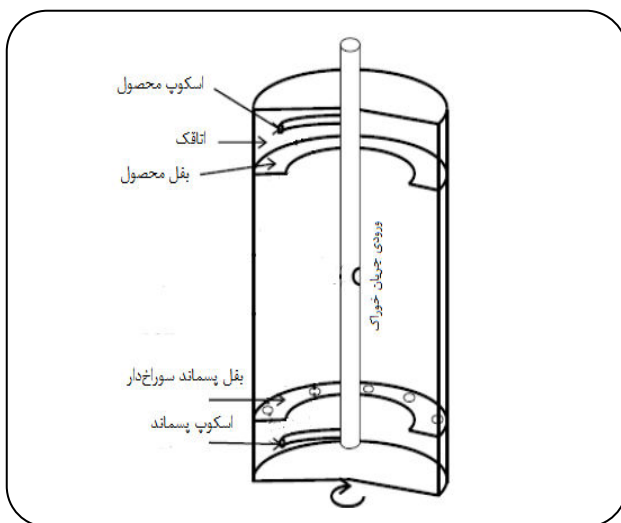
$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r H + \rho \bar{u}_r) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (8)$$

### مدل سازی اغتشاش جریان سیال

مدل اغتشاش مناسب برای تشریح اثر نوسان‌های لحظه‌ای سرعت‌ها و متغیرهای مقداری در معادله‌های بقاء مورد نیاز می‌باشد. با توجه به نبود نتیجه‌گیری همسویی در مورد استفاده از مدل‌های اغتشاش در سانتریفیوژها، در این مطالعه از دو مدل  $k-\epsilon$  RNG و RSM برای در نظر گرفتن اثرهای اغتشاش در جریان گازی درون سانتریفیوژ استفاده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های هندسی سانتریفیوژ شبیه‌سازی شده.

مقدار	کمیت
۰٫۴۸ متر	ارتفاع سانتریفیوژ
۰٫۰۶ متر	قطر سانتریفیوژ
۰٫۰۰۶ متر	قطر استوانه داخلی
۰٫۰۰۰۶ متر	ضخامت بافل
۰٫۰۰۲ متر	قطر سوراخ‌های بافل پایین
۰٫۰۰۴ متر	قطر ورودی جریان



شکل ۲- شمایی از سانتریفیوژ شبیه‌سازی شده.

شرایط اولیه به حد کافی باید دقیق باشند تا همگرایی به دست آید. در آغاز فشار سانتریفیوژ معادل فشار جریان ورودی تنظیم می‌شود و از این طریق سرعت نیز با استفاده از مقدار فشار اولیه تنظیم می‌شود. در شرط مرزی فشار ورودی قرار داده می‌شوند و پارامترهای درهمی نیز معادل مرز ورودی وارد می‌شوند. مقدار فشار ورودی ۴۱۰ Pa تنظیم می‌شود. همچنین برای مرزهای خروجی بالا و پایین از شرط مرزی فشاری خروجی استفاده شده است که مقدار ۴۱۵ Pa برای جریان فرآورده‌ی خروجی و ۴۱۸ Pa برای پسماند خروجی تنظیم می‌شود. برای فاز گاز شرط مرزی نبود لغزش در دیواره‌های داخلی و بافل‌ها و همچنین سقف و کف سانتریفیوژ در نظر گرفته شده است. از پوسته استوانه‌ای به ضخامت ۱ cm در دیواره بیرونی به عنوان ناحیه چرخش سانتریفیوژ با سرعت ۳۱۸ m/s استفاده شده است.

چون مدل RSM اثر انحنا خط جریان، گردش<sup>(۱)</sup>، چرخش<sup>(۲)</sup> و تغییرهای سریع نرخ کرنش را بهتر از مدل‌های دو معادله‌ای و یک معادله‌ای به حساب می‌آورد، در نتیجه می‌تواند جریان‌های پیچیده را به صورت بهتری حل کند. معادله‌های انتقال برای محاسبه تنش رینولدز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = & \quad (11) \\ - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left( \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \\ \rho \beta \left( g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta} \right) + p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - \\ 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} - 2\rho \Omega_k \left( u'_j u'_m \epsilon_{ikm} + u'_i u'_m \epsilon_{jkm} \right) \end{aligned}$$

جمله اول سمت چپ معادله نشان‌دهنده مشتق زمانی محلی است، جمله دوم سمت چپ معرف جا به جایی است که با  $C_{ij}$  نمایش می‌دهند، جمله اول تا آخر سمت راست نیز به ترتیب نشان‌دهنده نفوذ درهمی، نفوذ مولکولی، تولید تنش، تولید خاصیت شناوری، اتلاف و تولید به وسیله چرخش سامانه است که به ترتیب با نمادهای  $F_{ij}$ ،  $\epsilon_{ij}$ ،  $\phi_{ij}$ ،  $G_{ij}$ ،  $P_{ij}$ ،  $D_{L,ij}$ ،  $D_{T,ij}$  نمایش می‌دهند.

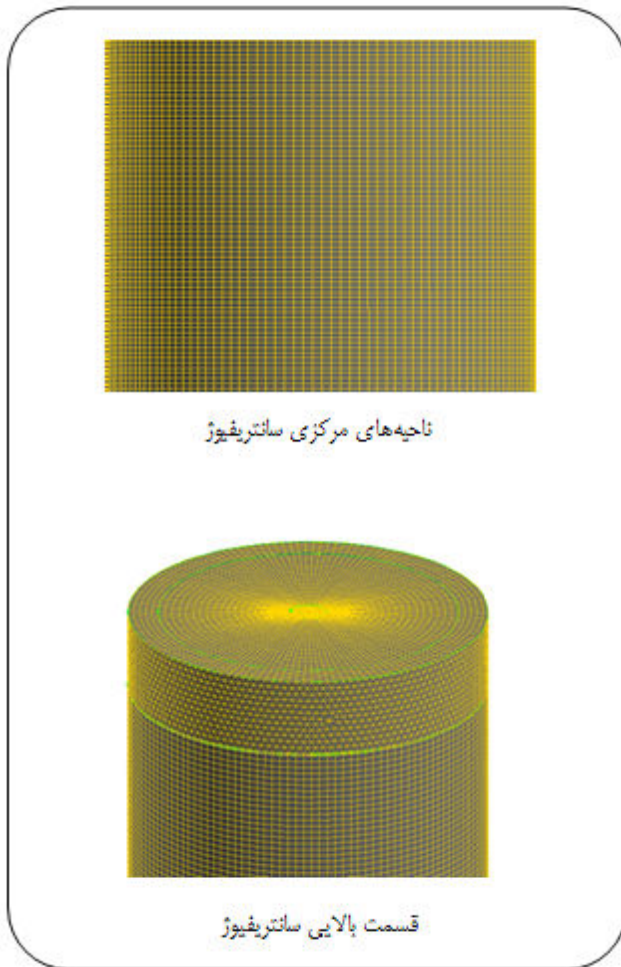
### تشریح هندسه، شرایط مرزی، اولیه و روش حل

در این مطالعه شبیه‌سازی هیدرودینامیک سانتریفیوژ گازی نسل سوم برای درک رفتار گاز متان انجام شده است. شمایی از دستگاه به همراه مختصات آن در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است جریان خوراک از قسمت مرکزی لوله داخلی (ارتفاع ۰٫۲۴ m) وارد دستگاه می‌شود. از دو مجرا برای خارج کردن فرآورده و پسماند به ترتیب در بالا و پایین برج با قطر ۰٫۰۰۶ متر و در ارتفاع‌های ۰٫۴۶۹۳۲ و ۰٫۱۰۹۲ متر استفاده شده است. همچنین بافل‌هایی در بالا و پایین سانتریفیوژ در ارتفاع‌های ۰٫۴۵۸۱ و ۰٫۲۱۳ متر قرار گرفته است. طبق شمای ارایه شده، سوراخ‌هایی بر روی بافل پایین به منظور افزایش میزان جداسازی تعبیه می‌شود.

در شبیه‌سازی عددی، شرایط اولیه متغیرهای میدانی برای فاز گاز، بایستی برای دامنه محاسباتی مشخص شوند که شامل فشار و سرعت گاز و همچنین مقدارهای مربوط به کمیت‌های درهمی می‌باشد.

(۱) Swirl

(۲) Rotation



شکل ۳- نمونه‌ای از شبکه محاسباتی ایجاد شده.

دیواره خارجی که ناحیه چرخش می‌باشد مقدارهای عدد ماخ در این دو ناحیه یکسان است اما به روشنی تفاوت بین شبکه‌ها در ناحیه داخلی دیده می‌شود. با توجه به افزایش ۵۰۰ هزار عدد در تعداد شبکه محاسباتی، تغییرهای ناچیزی در مقدارهای عدد ماخ به وجود آمده است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر تعداد شبکه‌های محاسباتی مقدار ۱۵۴۲۳۵۰ باشد نتیجه‌های شبیه‌سازی مستقل از اندازه شبکه خواهد بود.

#### توزیع فشار و سرعت درون سانتریفیوژ

شناسایی و تحلیل چگونگی حرکت سیال درون سانتریفیوژ از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین در این قسمت پروفیل‌های فشار و سرعت جریان گاز متان مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور شبیه‌سازی‌هایی در شرایط مرزی مینا

معادله‌های حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. از طرح‌های upwind مرتبه اول و دوم برای گسسته سازی معادله‌ها استفاده شده است. الگوریتم SIMPLE به منظور حل ترکیب سرعت - فشار و تصحیح استفاده شده است. بازه محاسباتی سه بعدی به وسیله ۱۲۸۵۰۱۷ سلول گسسته شده است. با توجه به پیچیدگی‌های هندسی فراوان، برای ایجاد شبکه مناسب سانتریفیوژ به چندین قسمت تقسیم شده است. اسکوپ‌های خروجی بالا و پایین و نواحی بالایی بافل بالا و زیرین بافل پایین و پوسته استوانه‌ای به طور جداگانه شبکه‌بندی شده‌اند. برای افزایش دقت و سرعت همگرایی سعی شده است تا در بیشتر نواحی از شبکه محاسباتی ساختار یافته استفاده شود. پوسته استوانه‌ای چرخان و کل نواحی مرکزی سانتریفیوژ توسط شبکه‌های شش گوشه مش بندی شده است. نمونه‌ای از شبکه محاسباتی استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

به منظور حفظ زمان محاسباتی و فراهم کردن نتیجه‌های به نسبت دقیق، مطالعه حساسیت شبکه برای انتخاب تعداد سلول‌های نهایی انجام شده است که نتیجه‌های عددی مستقلی از شبکه را به وجود آورد. برای در نظر گرفتن تغییرهای شدید در نزدیکی دیواره‌ها، شبکه‌های ریزتری برای این ناحیه‌ها استفاده شده است. برای به دست آمدن همگرایی گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه با حداکثر ۲۰ تکرار به ازای هر گام زمانی استفاده شده است. همگرایی حل مبتنی بر باقیمانده‌های سرعت، کسرهای حجمی و تعداد دیگری از پارامترها می‌باشد. با توجه به زمان محاسباتی بالا در شبیه سازی‌های CFD، شبیه سازی‌ها با استفاده از سامانه پردازش موازی (۲۴ هسته با سرعت ۲/۴ GHz) انجام شده است.

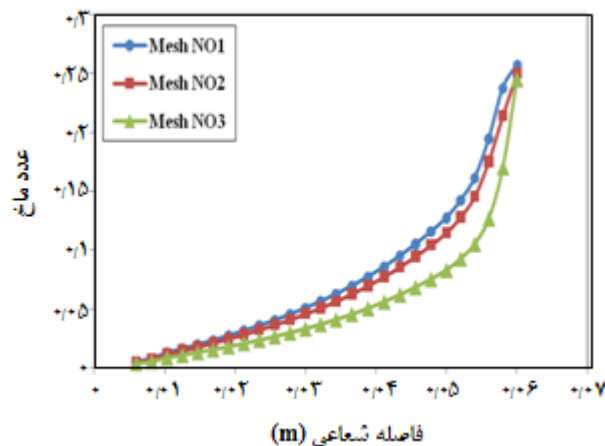
#### نتیجه‌ها و بحث

##### استقلال از اندازه شبکه‌های محاسباتی

تغییر تعداد شبکه‌های محاسباتی استفاده شده در دامنه حل، نتیجه‌های شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در این بخش اثر اندازه شبکه محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به طور ایده‌آل اندازه شبکه باید به قدر کافی ریز باشد که با افزایش بیشتر تعداد آن، نتیجه‌ها تغییر نکنند. برای بررسی استقلال نتیجه‌های به دست آمده از شبیه سازی عددی، از اندازه شبکه‌ها، شبیه‌سازی‌ها در شرایط مرزی مینا برای چند نوع انجام پذیرفت. مقدار عدد ماخ در اندازه‌های گوناگون شبکه محاسباتی در شکل ۴ رسم شده است. در شعاع‌های بسیار کم به دلیل پایین بودن سرعت و در نزدیکی

جدول ۲- تعداد سلول‌های شبکه‌های گوناگون.

شماره	تعداد شبکه
Mesh1	۱۲۸۵۰۱۷
Mesh2	۱۵۴۲۳۵۰
Mesh3	۲۰۳۹۱۷۵۲



شکل ۴- مقایسه عدد ماخ در شبکه‌های گوناگون.

بررسی پروفیل‌های فشار در شکل‌های ۵-الف و ۶-الف نشان می‌دهد که مطابق با پروفایل سرعت، فشار در دیواره‌های چرخان بیشترین مقدار را دارد و به صورت شعاعی تا دیواره‌های داخلی کاهش می‌یابد که مطابق نتیجه‌های گزارش شده پژوهش‌های پیشین می‌باشد [۱۹]. برای مشاهده دقیق‌تر مقادیرهای فشار در اطراف مجراهای خروج، پروفیل‌های فشار دور این ناحیه‌ها در بالای سانتریفیوژ به طور اختصاصی نشان داده شده است (شکل ۶-الف). در ناحیه‌های اطراف مجراهای خروج (بالا و پایین مجرای خروج) منطقه‌های کم فشاری دیده می‌شود که برای نشان دادن علت این موضوع پروفیل‌های فشار و بردارهای سرعت (شکل ۶-ب) دور مجرای خروج بالا رسم شده است. پروفیل فشار در مقطع عرضی که درست از وسط مجرای خروج می‌گذرد در شکل ۶-الف نشان می‌دهد که جریان کم فشاری در پشت مجرای خروج به وجود آمده است. از بردارهای سرعت فهمیده می‌شود که حرکت چرخشی سیال در زمان رسیدن به مجرای خروج منحرف شده و جریان با حرکت از روی مجرای خروج ادامه یافته است و سرانجام جریان از سطح عقبی مجرای خروج جدا می‌شود و یک منطقه برخاستگی<sup>(۱)</sup> در پشت مجرای خروج به وجود می‌آید با فاصله گرفتن از مجرای خروج بردارهای سرعت در جهت چرخش شکل گرفته است. بنابراین علت ایجاد ناحیه‌های کم فشار در اطراف مجراهای خروج، برخورد سیال در حال چرخش با سرعت بالا و ایجاد گردابه در پشت مجرای خروج می‌باشد.

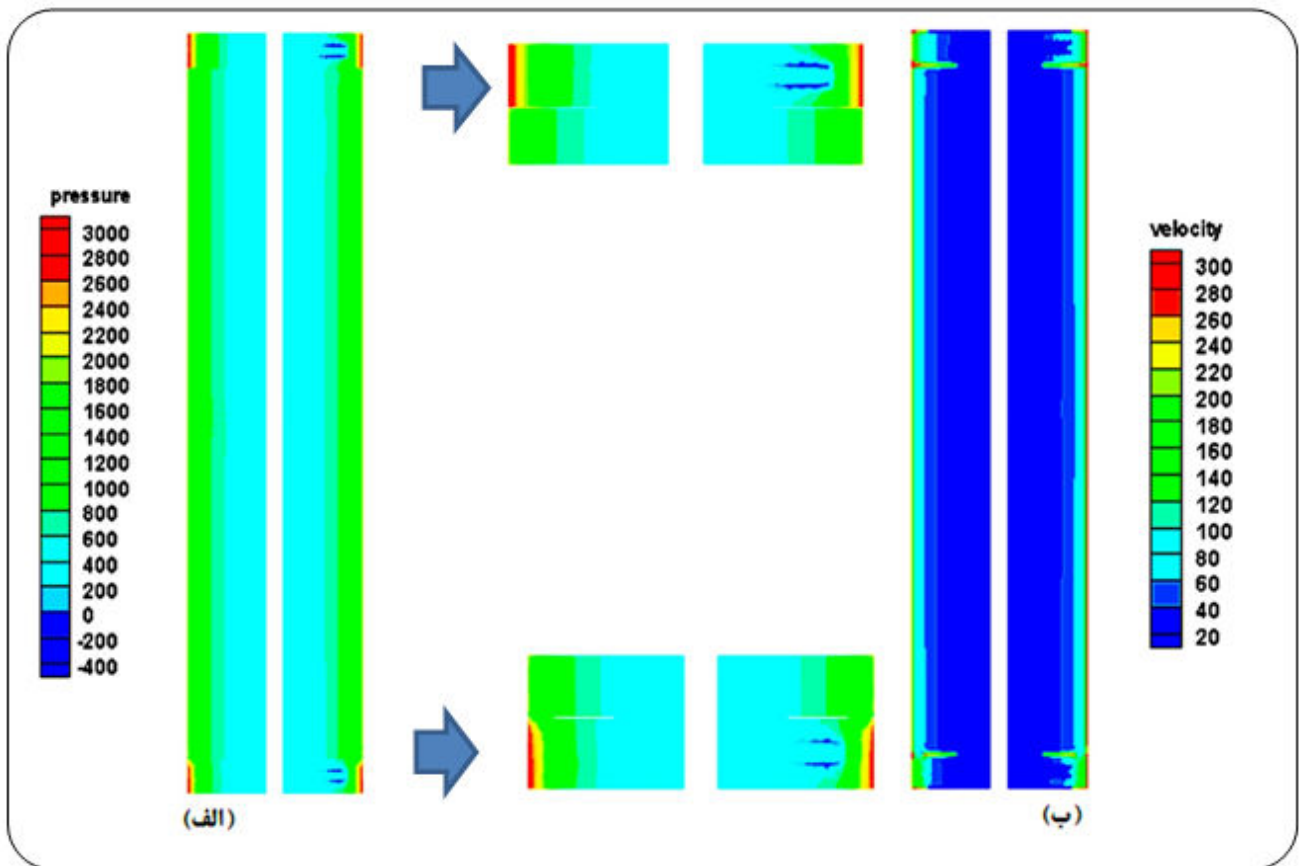
یکی از مباحث کلیدی سانتریفیوژها، چگونگی حرکت محوری سیال می‌باشد. برای بررسی این موضوع پروفیل‌های سرعت محوری سیال در برش‌های عرضی گوناگون و ارتفاع‌های گوناگون در شکل ۷ رسم شده است. برای یافتن دقیق ناحیه‌هایی که سرعت محوری مثبت یا منفی دارند پروفیل‌های سرعت منفی و مثبت به صورت جداگانه رسم شده است. همان‌گونه که کانتورها نشان می‌دهند چگونگی حرکت محوری سیال در نقطه ورود خوراک تغییر کرده است. بدین معنی که در برش‌های پایینی خوراک، جریان نزدیک دیواره‌ها به سمت پایین سانتریفیوژ در حرکت می‌باشد و در مرکز رو به بالا حرکت می‌کند. در برش‌های بالایی محل تزریق خوراک جریان در کنار دیواره‌ها رو به سمت بالا می‌باشد و تنها در ناحیه‌های مرکزی سرعت محوری منفی دیده می‌شود.

برای بررسی علت این تغییر رفتار پیچیده نمودارهای محوری فشار در شعاع‌های گوناگون در شکل ۸ ترسیم شده است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از مدل محاسباتی مشخص است که در نقطه ورود خوراک ( $X=0.07$ ) فشار فاز گاز

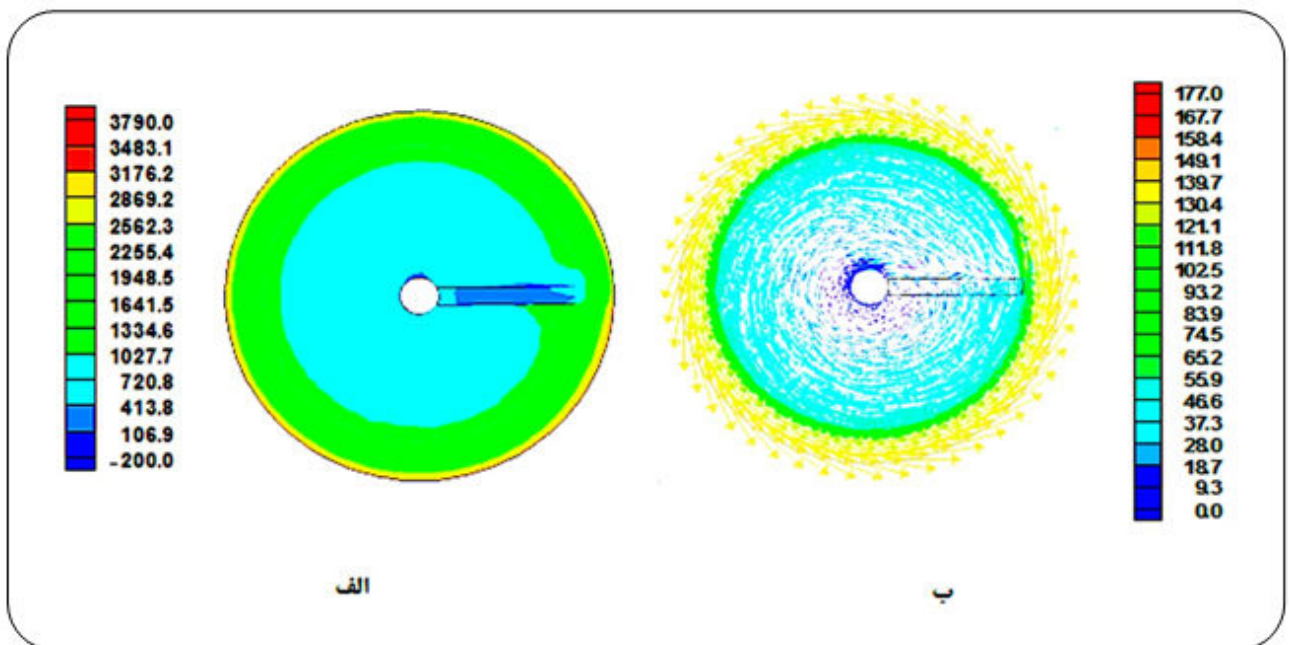
(سرعت چرخش دیوار ۳۱۸ m/s، فشارهای خروجی بالا و پایین به ترتیب ۴۱۵ و ۴۱۸ پاسکال و فشار ورودی ۴۱۰ pa) انجام شده است.

نتیجه‌های این شبیه‌سازی به صورت پروفیل‌هایی از سرعت و فشار در مقطع طولی سانتریفیوژ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، برای افزایش تأثیر چرخش دیواره‌ی بیرونی بر مقدارهای سرعت ناحیه‌های داخلی، از چرخش ناحیه‌ی باریک در نزدیک دیواره‌ی خارجی با سرعت چرخش دیواره استفاده شده است. به این ترتیب در این ناحیه‌ی سرعت چرخش معادل ۳۱۸ m/s می‌باشد که بیشترین سرعت در این ناحیه می‌باشد و با کاهش شعاع، سرعت سیال به صورت شعاعی از دیواره‌ی خارجی چرخان تا دیواره‌ی داخلی ساکن کاهش می‌یابد. در بالا و پایین سانتریفیوژ به علت تأثیرهای بافل‌ها در کاهش سرعت محوری جریان، کارایی ناحیه‌ی چرخش بر مقدارهای سرعت داخلی افزایش یافته است و سرعت این نواحی را بالا برده است. در ناحیه‌های بالایی و پایین سانتریفیوژ، قرارگیری مجراهای خروج بر سر راه چرخش سیال باعث کاهش شدید سرعت می‌شود و به همین خاطر در تمام نواحی طولی مجرای خروج پروفیل سرعت مقدار ناچیزی را نشان می‌دهند.

(۱) Wake

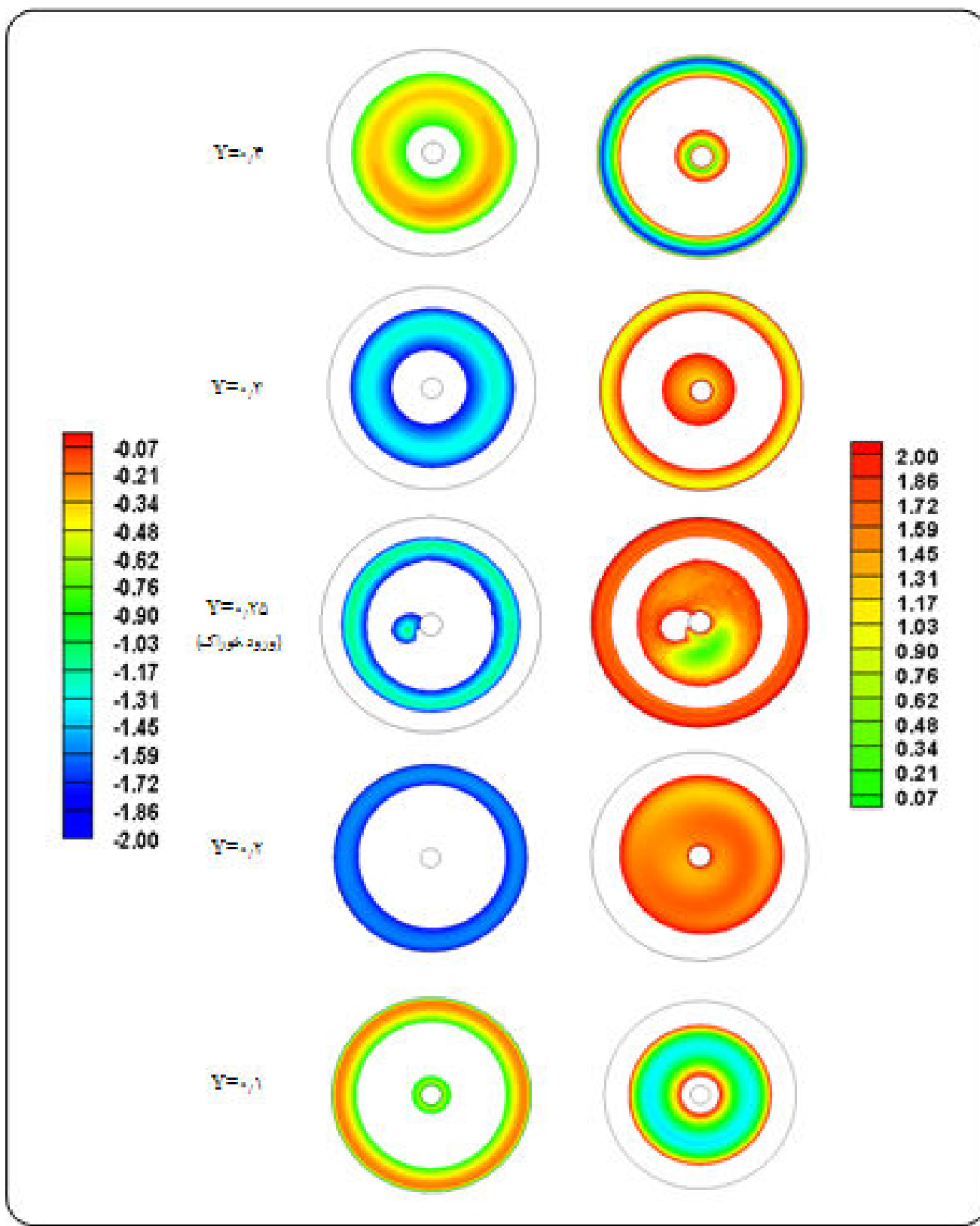


شکل ۵ - الف - پروفیل طولی فشار (Pa)، ب - پروفیل‌های طولی سرعت گاز (m/s).

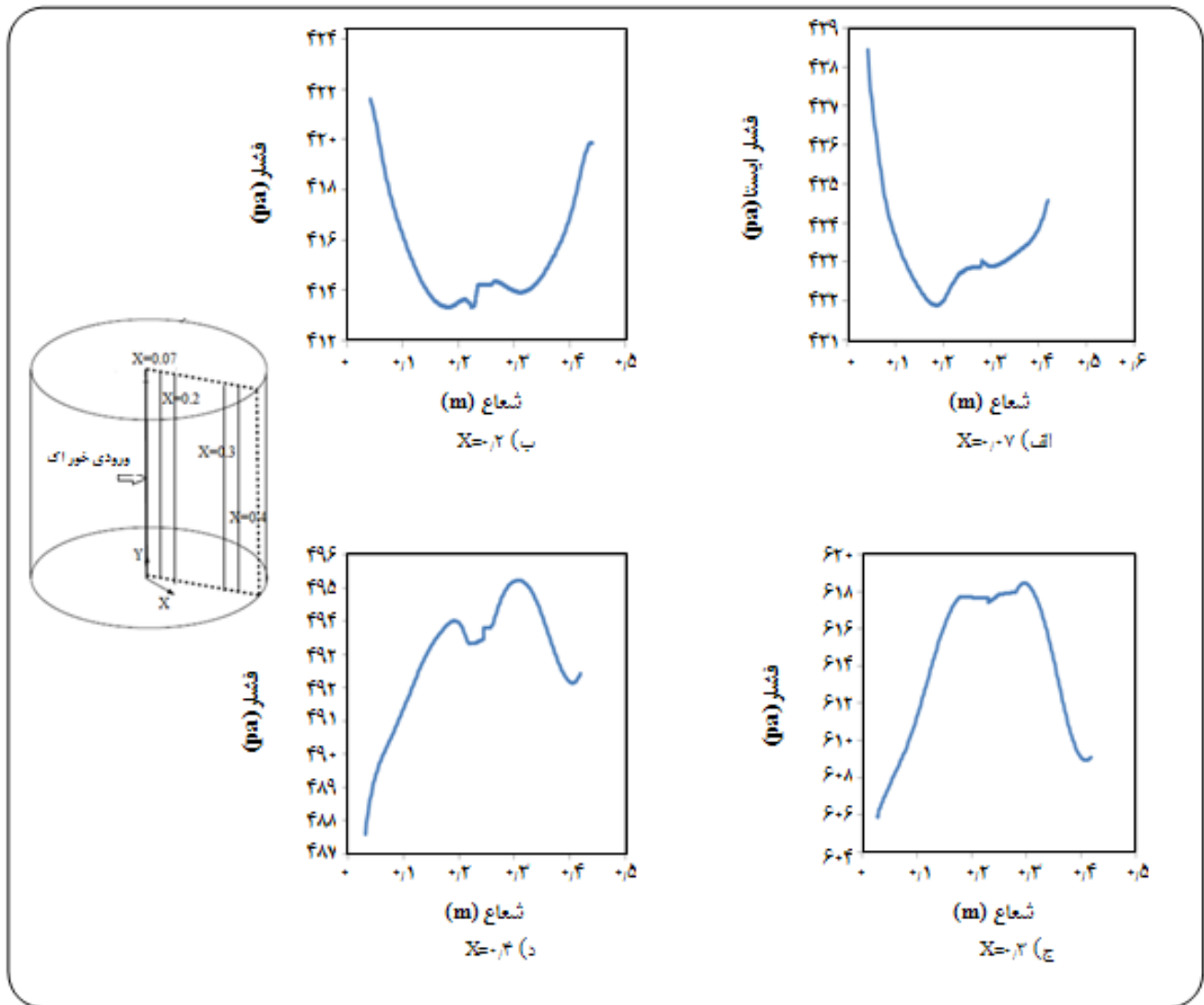


شکل ۶ - الف - پروفیل فشار (Pa) و ب - بردار سرعت (m/s) در برش عرضی دور اسکوپ بالا.





شکل ۷- کانتورهای سرعت محوری (m/s) در برش عرضی و ارتفاع‌های گوناگون.

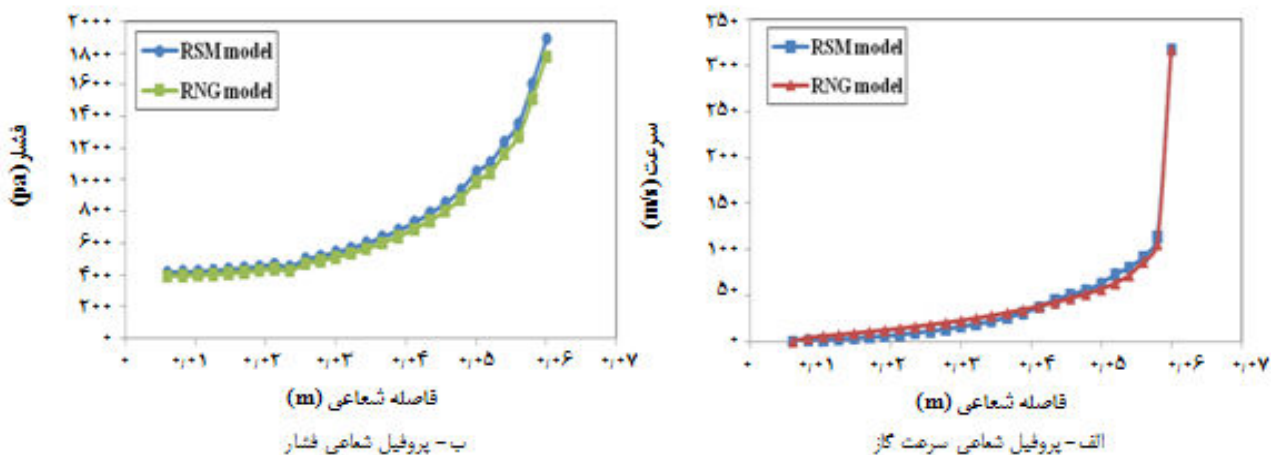


شکل ۸ - پروفیل‌های فشار استاتیک در طول ارتفاع در شعاع‌های گوناگون.

#### مقایسه مدل اغتشاش بر هیدرودینامیک سانتریفیوژ

انتخاب مدل اغتشاش مناسب برای در نظر گرفتن اثرهای اغتشاش بر میدان جریان به‌ویژه در جریان‌های چرخشی از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل اغتشاش که بتواند برای تمام حالت‌ها و مسائل گوناگون به کار رود متأسفانه وجود ندارد و انتخاب مدل اغتشاش به ملاحظاتمانند فیزیک جریان، میزان دقت مورد نیاز و قدرت منابع محاسباتی وابسته می‌باشد. البته برای انتخاب یک مدل اغتشاش مناسب باید توانایی‌ها و محدودیت‌های تمام مدل‌ها و حالت‌ها بررسی شود. مدل‌های گوناگونی برای بررسی اثر اغتشاش بر میدان هیدرودینامیکی سانتریفیوژ ارائه شده است که بر طبق شرایط مسئله مورد شبیه‌سازی انتخاب می‌شوند.

به عنوان نقطه کمینه ظاهر شده است (شکل ۸-الف)). بدین معنی که نواحی بالا و پایین سانتریفیوژ در نزدیکی دیواره داخلی تحت تأثیر فشارهای خروجی (به ترتیب ۴۱۵ و ۴۱۸ پاسکال)، فشار بیشتری نسبت به نواحی نزدیک مرز ورودی که تحت تأثیر فشار ورودی ۴۱۰ می‌باشند خواهند داشت. بدین ترتیب جریان در نزدیکی دیواره از بالا به سمت ناحیه ورود خوراک و از پایین سانتریفیوژ به سمت مرکز جریان می‌یابد. در شعاع‌های ۰/۴ و ۰/۳ این روند به طور کامل وارون شده است. بدین صورت که فشار در ناحیه‌های مرکزی نسبت به بالا و پایین مقادیر بیشتری خواهد داشت و باعث حرکت جریان از مرکز به سمت بالا و پایین خواهد شد (شکل ۸-ج و ۸-د).



شکل ۹- مقایسه پروفیل شعاعی فشار و سرعت توسط دو مدل اغتشاش RSM و k-ε RNG.

به عنوان شرط مرزی تنظیم می‌شوند. نتیجه‌های پروفیل‌های دما و دانسیته به دست آمده از مدل محاسباتی در مقطع طولی سانتریفیوژ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، دمای سیال در نزدیکی دیواره خارجی به صورت خطی از کف سانتریفیوژ تا بالای آن افزایش پیدا می‌کند. همچنین دمای نواحی بالای بافل بالایی و زیر بافل پایینی تحت تأثیر دمای سقف و کف سانتریفیوژ، دمایی نزدیک به آن مرزها دارند. پروفیل‌های دانسیته رفتاری درست عکس پروفیل دمایی را نشان می‌دهند. بدین صورت که در نقطه بیشینه دمایی مقدار دانسیته کمینه می‌باشد و برعکس (بر طبق قانون گاز ایده‌ال). همان‌گونه که در بخش‌های پیشین بحث شد فشار در نزدیکی دیواره خارجی سانتریفیوژ بیشینه می‌باشد و با نزدیک شدن به سمت دیواره‌های داخلی، فشار کاهش می‌یابد. بنابراین در نزدیکی دیواره چرخان بیشترین فشار و دما را خواهیم داشت اما با توجه به اینکه مرتبه بزرگی فشار ایستا نسبت به فشار عملیاتی بسیار پایین می‌باشد، تغییرهای شعاعی فشار ایستا تأثیر چندانی بر روی دانسیته نخواهد گذاشت و مقدار تغییر دما تعیین کننده دانسیته سیال خواهد بود بنابراین به این علت است که پروفیل‌های دما و دانسیته نسبت به همدیگر متقارن هستند.

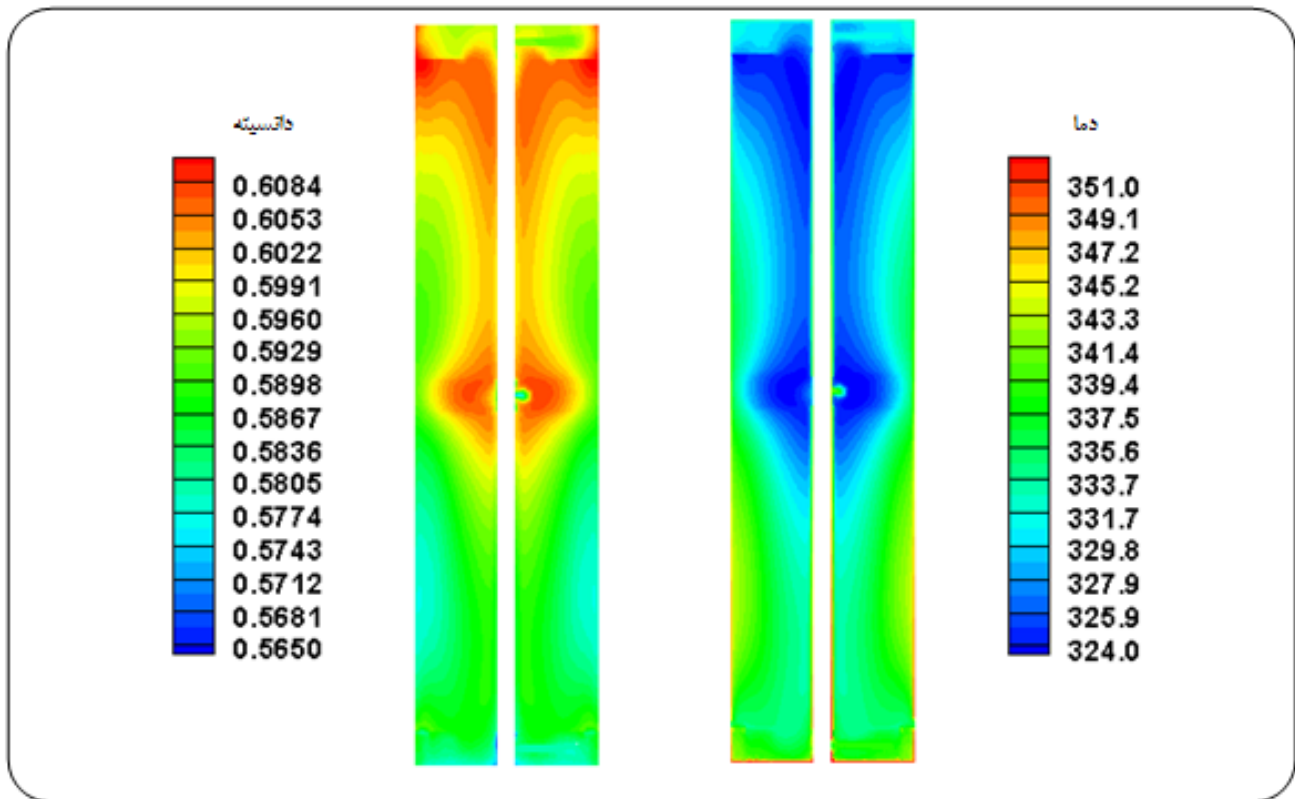
### نتیجه‌گیری

به دلیل اهمیت سانتریفیوژ گازی در صنایع گوناگون به منظور جداسازی اجزای گازی، هیدرودینامیک این دستگاه‌ها در حالت ناپایا

با توجه به سرعت چرخش بالا درون سانتریفیوژ و کاربرد مدل‌های RSM و k-ε RNG در این‌گونه جریان‌ها شبیه‌سازی‌هایی در شرایط مرزی مبنا انجام شده است. نتیجه‌های شبیه‌سازی در مورد سرعت چرخش و فشار شعاعی سیال درون سانتریفیوژ در ارتفاع ۰/۴ از کف سانتریفیوژ در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که در بخش پیش نیز گفته شد در کنار دیواره‌ها سرعت و فشار بیشینه می‌باشد و به طور پیوسته تا نزدیکی دیواره داخلی این دو پروفیل روند کاهش دارند. همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است هر دو مدل در همی روند یکسانی از توزیع فشار و سرعت را نتیجه داده‌اند و اختلاف ناچیزی بین آن‌ها دیده می‌شود. مدل k-ε RNG به واسطه داشتن جمله‌های اضافی در حل معادله ε در جریان‌های به تندی کرنش یافته دقت دلخواهی دارد. از سویی به علت اینکه مدل RSM برای تعیین تنش‌های رینولدز از حل معادله‌های انتقال و برای محاسبه نرخ اتلاف (ε) از یک معادله اضافی دیگر استفاده می‌کند زمان محاسبه‌ها و در راستای آن دقت نتیجه‌ها بالا خواهد رفت. بنابراین با توجه به اختلاف ناچیز بین نتیجه‌ها به کارگیری دو مدل اغتشاش در مدل محاسباتی، مدل k-ε RNG به خاطر کاهش در هزینه محاسباتی مدل مناسبی می‌باشد.

### بررسی پروفیل دما در سانتریفیوژ گازی

با توجه به اینکه دما در دیواره خارجی ثابت نیست و بر طبق یک معادله خطی، دما در روی دیواره تغییر می‌کند به طوری که دما در سقف، کف و ورودی سانتریفیوژ به ترتیب ۳۳۳، ۳۵۳ و ۳۴۳ کلوین



تسکل ۱- الف) پروفیل دما در طول سانتریفیوژ ب) تغییرهای دانسیته در برش طولی سانتریفیوژ.

سیال حاصل از مدل محاسباتی دیده می‌شود که چگونگی حرکت محوری سیال در نقطه ورود خوراک تغییر کرده است. بدین معنی که در مقاطع پایینی خوراک، جریان نزدیک دیواره‌ها به سمت پایین سانتریفیوژ در حرکت می‌باشد و در مرکز رو به بالا حرکت می‌کند و در بالای سانتریفیوژ عکس این رفتار دیده می‌شود.

### فهرست نمادها

$\rho$	جرم مخصوص، $\text{kg/m}^3$
$\vec{v}$	بردار سرعت، $\text{m/s}$
$\tau$	تنسور تنش، $\text{Pa}$
$g$	شتاب گرانشی، $\text{m/s}^2$
$P$	فشار، $\text{Pa}$
$\mu$	ویسکوزیته دینامیک، $\text{kg/m.s}$
$\vec{v}_r$	سرعت نسبی، $\text{m/s}$
$g_i$	مؤلفه بردار گرانش در راستای $i$ ، $\text{m/s}^2$
$\mu_{\text{eff}}$	ویسکوزیته مؤثر، $\text{kg/m.s}$
$k$	انرژی سینتیک اغتشاش، $\text{m}^2/\text{s}^2$

با استفاده از فناوری CFD به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. معادله‌های حاکم بر جریان سیال، شامل معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انتقال گرما، در ناحیه دورانی سانتریفیوژ با استفاده از دیدگاه MRF و در ناحیه ساکن به طور جداگانه حل شده و اثر مرزی بین نواحی ساکن و متحرک دیده می‌شود. با مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌های اغتشاش  $\text{RNG k-}\epsilon$  و  $\text{RSM}$  در جمله‌های سرعت و فشار در جهت شعاع سانتریفیوژ چنین نتیجه می‌شود که مدل  $\text{RNG k-}\epsilon$  دقت محاسباتی مناسب به همراه هزینه محاسباتی پایین را دارا می‌باشد. نتیجه‌های به دست آمده از مدل محاسباتی به صورت پروفیل‌هایی از سرعت و فشار در مقطع طولی نشان می‌دهد که در دیواره‌های خارجی فشار و سرعت بیشینه می‌باشد و با کاهش شعاع، سرعت و فشار به صورت شعاعی از دیواره‌ی چرخان تا دیواره‌ی داخلی ساکن کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر بافل‌ها در ایجاد فشار و سرعت بیشینه در دیواره‌ی چرخان خارجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه‌های شبیه‌سازی از ایجاد ناحیه کم فشار در پشت اسکوپ‌ها را نشان می‌دهند. با بررسی سرعت‌های محوری

$\varepsilon_{ij}$	اتلاف به وسیله‌ی چرخش، $\text{kg/m.s}^3$	$\varepsilon$	نرخ اتلاف انرژی سینتیکی اغتشاش، $\text{m}^2/\text{s}^3$
$\Phi_{ij,1}$	ترم کشش فشاری آهسته، $\text{kg/m.s}^3$	$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$	اعداد پراوتل مؤثر معکوس برای $\varepsilon$ و $k$
$\Phi_{ij,2}$	ترم کشش فشاری سریع، $\text{kg/m.s}^3$	$G_k$	تولید انرژی سینتیک اغتشاش، $\text{kg/m.s}^3$
$\Phi_{ij,\omega}$	ترم انعکاس دیواره، $\text{kg/m.s}^3$	$G_b$	تولید انرژی سینتیکی اغتشاش به واسطه‌ی نیروی شناوری، $\text{kg/m.s}^3$
$t$	زمان، $s$		
$\omega, \Omega$	سرعت زاویه‌ای روتور، $1/s$	$Y_M$	انبساط آشفته‌گی در اغتشاش تراکم‌پذیر، $\text{kg/m.s}^3$
$I$	تنسور بیکه	$D_{t,ij}$	نفوذ اغتشاش، $\text{kg/m.s}^3$
$\bar{a}$	بردار بیکه	$D_{L,ij}$	نفوذ مولکولی، $\text{kg/m.s}^3$
		$P_{ij}$	تولید تنش تولید تنش، $\text{kg/m.s}^3$
		$G_{ij}$	تولید نیروی شناوری، $\text{kg/m.s}^3$

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲

## مراجع

- [1] Golombok M., Bill K., Removal of CO<sub>2</sub> from a Gas Stream Using An Experimental Centrifuge, *Ind. Eng. chem*, **44**, p. 4721 (2005).
- [2] Van Wissen R., Golombok M., Brouwers J.J.H., Separation of Carbon Dioxide and Methane in Continuous Countercurrent Gas Centrifuges, *Chemical Engineering Science*, **60**, p. 4397 (2005).
- [3] Cohen K., "The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of U 235", McGraw-Hill, New York, (1951).
- [4] Cloutman, L.D., Gentry R.A., "Numerical Simulation of the Countercurrent Flow in a Gas Centrifuge", Technical Report, Los Alamos National Laboratory, (1983).
- [5] Park J.K., Hyun J.M., Numerical Solutions for Thermally Driven Compressible Flows in a Rapidly Rotating Cylinder, *Fluid Dynamics Research*, **6**, p. 139 (1990).
- [6] Harada I., A Numerical Study of Weakly Compressible Rotating Flows in a Gas Centrifuge, *Nucl. Sci. Eng.*, **73**, p. 225 (1980).
- [7] Ungarish M., Israeli M., Axisymmetric Compressible Now in a Rotating Cylinder with Axial Convection, *J. Fluid Mech.*, **154**, p. 121 (1985).
- [8] Kai T., Hasegawa K., Numerical Calculation of Flow and Isotop Separation for SF<sub>6</sub> Gas Centrifuge, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **37**, p. 153 (2000).
- [9] Dongjun J., Shi Z., CFD Simulation of 3D Flow Field in a Gas Centrifuge, 14th International Conference on Nuclear Engineering, Florida, USA, (2006).