

کاربرد این فوم برای شبیه‌سازی عددی تأثیر محرک گرمایی بر جریان گاز درون یک سانتریفیوژ گازی در حالت جریان برگشتی کامل

ولی‌اله غضنفری^۱، علی‌اکبر صالحی^۲، علیرضا کشتکار^{*۱}، محمدحسین عسکری^۳، محمدمهدی شادمان^۲
 ۱. پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
 ۲. دانشکده‌ی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۱۱۴-۱۴۵۶۵، تهران - ایران
 ۳. شرکت فن‌آوری‌های پیشرفته‌ی ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۵۴۳۱-۱۴۳۹۹، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۲۰

چکیده

عملکرد یک سانتریفیوژ گازی که در صنعت غنی‌سازی اورانیم استفاده می‌گردد به شدت به میدان جریان گاز درون آن وابسته است. برای بررسی میدان جریان گاز، نیاز به شبیه‌سازی کامپیوتری است. از این رو در این مطالعه توانایی‌ها و قابلیت‌های نرم‌افزار این فوم برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور برای حالت جریان برگشتی کامل (بدون ورود و خروج جریان) با محرک گرمایی در حالت متقارن محوری مورد بررسی قرار گرفت. اعتبارسنجی شبیه‌سازی با این فوم با بررسی نتایج حل تحلیلی مدل اولاندر و حل عددی مدل هارادا و همچنین مقایسه با نتایج شبیه‌سازی با فلونت انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی جریان برای سانتریفیوژ مدل نشان داد که انتخاب حل‌گر بر پایه چگالی و تعداد سلول 160×170 برای شبکه‌بندی مناسب می‌باشد. ارزیابی توانایی مدل نشان داد که نرم‌افزار این فوم به خوبی قادر به شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی توزیع عدد نادنسن، وجود ناحیه مولکولی نزدیک محور دوران را تأیید کرد. با توجه به این که این فوم یک نرم‌افزار متن‌باز است و قابلیت حل ناحیه مولکولی و همچنین کدنویسی برای کوپل ناحیه پیوسته و مولکولی، که در نرم‌افزار فلونت ممکن نیست، در آن وجود دارد، از این رو استفاده از آن برای شبیه‌سازی جریان درون روتور پیشنهاد می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: سانتریفیوژ گازی، محرک دمایی، جریان چرخشی، شبیه‌سازی عددی، این فوم

OpenFoam application for numerical simulation of thermal drive effect on gas flow in a gas centrifuge for total reflux

V. Ghazanfari¹, A.K. Salehi², A.R. Keshtkar^{*1}, M.H. Askari³, M.M. Shadman³

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

2. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 14565-1114, Tehran - Iran

3. Advanced Technologies Company of Iran, AEOI, P.O.Box: 14399-55431, Tehran - Iran

Research Article

Received 10.10.2019, Accepted 9.2.2020

Abstract

The performance of a uranium gas centrifuge which is used in the uranium enrichment industry depends strongly on the gas flow field. The computer simulation is vital to examine the gas flow field. Therefore, in the present study, the capabilities of OpenFoam software for simulating the gas flow inside the rotor for total reflux thermal drive-in axisymmetric mode has been investigated. The results corresponding to the OpenFoam simulation have been validated with those of analytical Olander's model, numerical solution of the Harada's study, and simulation using Fluent. The simulation results for gas flow inside the rotor of centrifuge showed that the density-based solver was properly chosen and the number of cells, 160×170 , was compatible with mesh. The numerical results show that OpenFoam software was capable to examine the gas flow inside the rotor. Also, the simulation of the distribution of Knudsen number confirms the presence of the molecular region near the axis of rotation. OpenFoam is open-source software and there is the ability to solve the molecular region as well as the coding for coupling the continuous and molecular region, the feature which does not exist in the fluent software. The use of open foam is therefore recommended to simulate gas flow inside the rotor.

Keywords: Gas centrifuge, Thermal drive, Circulation flow, Numerical simulation, OpenFoam

*Email: akeshtkar@aioi.org.ir

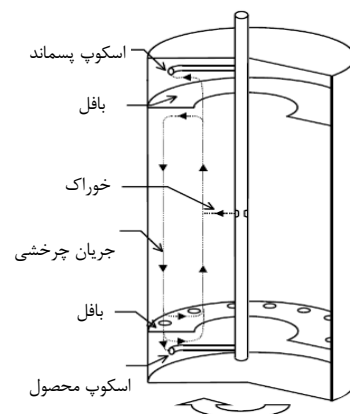
۱. مقدمه

هم‌چنین به‌علت نیروی گریز از مرکز، تغییرات فشار در جهت شعاعی نمایی فرض می‌شود، به‌طوری‌که فشار حدود ۵ تا ۶ مرتبه از محور تا دیواره افزایش می‌یابد [۴]. علاوه بر این، ایجاد شوک در اثر برخورد جریان گاز با سر اسکوپ‌ها و مشکلات به‌وجود آمده در هم‌گرایی و شبکه‌بندی روتور از پیچیدگی‌های شبیه‌سازی این مسئله می‌باشد [۵]. با توجه به موارد ذکر شده، مطالعات انجام گرفته با شیوه‌های گوناگونی به تحلیل جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته‌اند که می‌توان به حل روتور بلند^۱ [۶] و حل لایه مرزی^۲ (اونساگر) [۷، ۸، ۹]. اشاره کرد. لازم به توضیح است که روش‌های مذکور با فرضیات و ساده‌سازی‌های گوناگون به‌صورت تحلیلی حل شده‌اند.

امروزه با ارتقاء رایانه‌ها از لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، روش‌های عددی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سال ۱۹۷۶ کای با روش انتگرال‌گیری عددی از معادلات ناویراستوکس، جریان تراکم‌پذیر در حالت متقارن محوری^۳ را مورد مطالعه قرار داد. او برای چرخش جریان از عوامل محرک هم‌چون گرادیان دمای دیواره و ورود خوراک استفاده کرد [۱۰]. در سال ۱۹۷۷ سابرامیر و لاهارگو با استفاده از روش المان محدود و با برنامه‌نویسی به زبان فرترن^۴، به بررسی میدان سرعت، دما، فشار و غلظت ایزوتوپ‌ها درون روتور سانتریفیوژ در حالت مدل متقارن محوری پرداختند [۱۱]. در سال ۱۹۸۴ ریباندو با استفاده از روش تفاضل محدود^۵ جریان گاز درون سانتریفیوژ را در حالت متقارن محوری مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه معادلات ناویراستوکس خطی‌شده با روش گام زمانی حل شد [۱۲]. بوریسویچ و همکارانش در سال ۲۰۰۰، حل عددی معادلات ناویراستوکس را در حالت مدل متقارن محوری مورد بررسی قرار دادند. محاسبات آنان نشان داد وابستگی توان جداسازی ماشین به پارامترهای هندسی و موقعیت بیلوز به همان نسبت نیروی درگ اسکوپ و جریان خوراک اهمیت دارند. آن‌ها در این مطالعه از روش تفاضل محدود استفاده کردند [۱۳]. در سال ۲۰۰۶، شی زنگ و همکارش شبیه‌سازی جریان گاز درون سانتریفیوژ را با استفاده از روش دینامیک

در یک ماشین سانتریفیوژ، گاز با ترکیبی از دو یا چند ایزوتوپ وارد روتور می‌شود و تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز شدید ناشی از دوران روتور، لایه‌بندی شعاعی در ماشین ایجاد می‌گردد. در این شرایط جز سنگین‌تر نزدیک دیواره و جز سبک‌تر در فاصله‌های دورتر از دیواره و نزدیک‌تر به محور قرار می‌گیرد. به این ترتیب جدایش شعاعی بین ایزوتوپ‌ها رخ می‌دهد [۱]. در جدایش شعاعی، ضریب جداسازی بسیار پایین است؛ به‌منظور افزایش ضریب جداسازی، باید حرکت محوری و جدایش محوری ایجاد گردد. از طریق عوامل محرکی مانند گرادیان دمای دیواره، اختلاف دمای کپ‌ها، حضور اسکوپ و ورود خوراک یک جریان محوری درون روتور سانتریفیوژ تولید شده و بنابراین علاوه بر جدایش شعاعی، جدایش محوری هم ایجاد می‌گردد. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از یک ماشین سانتریفیوژ نشان داده شده است.

به‌طور کلی هدف از بررسی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ، رسیدن به جریان محوری مطلوب برای جداسازی ایزوتوپ‌های موردنظر است. از این‌رو تلاش می‌گردد عواملی که بر روی جریان محوری تأثیرگذار هستند مورد مطالعه قرار گیرد تا بتوان عملکرد سانتریفیوژ را بهبود داد. بنابراین ضروری است رفتار گاز مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردد و تغییرات فشار، دما و سرعت به‌منظور ارزیابی عملکرد روتور برای ایجاد جریان محوری و در نهایت جداسازی ایزوتوپ‌ها ارزیابی گردد. برای انجام شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ پیچیدگی‌هایی وجود دارد. به‌دلیل سرعت دورانی بسیار بالای روتور، بخش عمده‌ای از جریان نزدیک دیواره قرار می‌گیرد و فضای زیادی از حجم روتور ناحیه خلأ یا رقیق می‌گردد که به‌دلیل عدم برقراری فرض پیوستگی، نمی‌توان از معادلات ناویراستوکس در این ناحیه استفاده کرد [۳].



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از ماشین سانتریفیوژ [۲].

1. Long Rotor
2. Boundary Layer
3. Axisymmetric Model
4. Fortran
5. Finite Difference Method

کردند و با مقایسه نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی، نشان دادند که داده‌های به‌دست آمده از دقت خوبی برخوردار است [۱۸]. در سال ۲۰۱۸ وات و همکارانش شبیه‌سازی جریان در مسایل مختلف از جمله جریان فراصوت بر روی یک صفحه تخت، جریان مولکولی آزاد بر روی یک سیلندر و جریان در میکرونازل‌ها را با استفاده از روش DSMC موجود در نرم‌افزار این فوم انجام دادند. نتایج حاصل از مطالعات ایشان حاکی از دقت خوب حل‌گر DSMC موجود در نرم‌افزار این فوم در مقایسه با سایر روش‌ها بود [۱۶].

هدف از مطالعه حاضر بررسی توانایی و توسعه کاربرد این فوم برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ می‌باشد. از این رو با استفاده از نرم‌افزار این فوم، شبیه‌سازی کل نواحی درون روتور در حالت متقارن محوری و بدون ورود و خروج جریان انجام گرفته است. حل‌گر مورد استفاده در این نرم‌افزار، حل‌گر تراکم‌پذیر بر مبنای چگالی (rhoCentralFoam) و مناسب برای جریان‌های فراصوت می‌باشد. برای ایجاد جریان چرخشی از محرک گرادیان دمای دیواره و دو محرک دمایی کپ بالا و پایین استفاده شده است. اعتبارسنجی شبیه‌سازی این فوم، مسایل تکنیکی استفاده شده در مدل و همچنین ارزیابی مدل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی این فوم، دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ حالت اول مقایسه با نتایج شبیه‌سازی در مقالات تحلیلی (اولاندر) و مقالات عددی (هارادا) و حالت دوم مقایسه با نتایج شبیه‌سازی فلوئنت می‌باشد. در بحث مسایل تکنیکی، چگونگی انتخاب حل‌گر و استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها توانایی مدل برای محاسبه متغیرهای فشار، دما و سرعت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. معادلات حاکم بر جریان گاز

گام نخست برای بررسی مسئله حاضر، تعیین معادلات حاکم بر جریان می‌باشد. معادلات حاکم بر گاز در مختصات استوانه‌ای و در حالت متقارن محوری (حذف مشتقات نسبت به θ) به صورت زیر بیان شده است:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru\rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho) = 0 \quad (1)$$

سیالات محاسباتی (CFD)^۱ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل معادلات ناویر استوکس از روش حجم محدود^۲ و روش ضمنی اختلاف بالادست مرتبه دوم استفاده کردند [۱۴]. در سال ۲۰۱۳ بوگوالو و همکارانش با استفاده از روش عددی به بررسی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ و جداسازی ایزوتوپ‌ها در حالت مدل متقارن محوری پرداختند. روش به کار گرفته شده با روش‌های نیمه‌تحلیلی مقایسه و دقت آن بررسی شد [۴]. در تمامی این مطالعات، که با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده‌اند، تنها ناحیه پیوسته مدل شده است در صورتی که برای بررسی عملکرد سانتریفیوژ نیاز به مدل‌سازی کل نواحی درون روتور می‌باشد. بنابراین استفاده از روش‌ها، کدها و ابزارهای محاسباتی پیشرفته و جدید و همچنین توسعه آن‌ها ضروری است. یکی از ابزارهای محاسباتی جدید نرم‌افزار این فوم می‌باشد. این فوم نرم‌افزاری متن‌باز است که در آن قابلیت اصلاح، تغییر کد، افزودن معادلات و مدل‌های جدید وجود دارد که با توجه به شرایط خاص مسئله حاضر، این قابلیت بسیار مفید خواهد بود. در این نرم‌افزار قابلیت حل ناحیه مولکولی با استفاده از روش مستقیم شبیه‌سازی مونت-کارلو (DSMC)^۳ و همچنین قابلیت نوشتن حل‌گر برای کوپل ناحیه پیوسته و مولکولی وجود دارد که از جمله مزایای آن نسبت به سایر نرم‌افزارها مانند فلوئنت به‌شمار می‌رود. قابل ذکر است که کدهای این نرم‌افزار به زبان C++ نوشته شده است و برخی از صنایع معتبر جهان، با استفاده از حل‌گرهای پایه این نرم‌افزار، نرم‌افزارهایی تخصصی برای تحلیل و شبیه‌سازی فیزیک‌های خاص مورد نظر خود را استخراج نموده‌اند [۱۵، ۱۶]. در سال ۲۰۱۳ قابلیت‌های حل‌گرهای CFD موجود در نرم‌افزار این فوم برای جریان‌های فراصوت توسط شن‌چان و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت به‌طوری‌که نتایج به‌دست آمده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حاکی از دقت و صحت این حل‌گرها بود [۱۷]. در سال ۲۰۱۶ فاربر و همکارانش به توسعه معادلات ناویراستوکس و DSMC برای شبیه‌سازی جریان گازهای رقیق برای تولید دیوهای ارگانیک پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار این فوم استفاده

1. Computational Fluid Dynamics
2. Finite Volume Method
3. Direct Simulation Monte Carlo

محوری از تغییرات نسبت به θ صرف نظر شده است. μ و k به ترتیب ضریب لزجت و ضریب انتقال حرارت هدایتی می‌باشند و $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ نسبت ظرفیت حرارتی ویژه در فشار و حجم ثابت است. لازم به ذکر است رژیم جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده است.

معادله تکانه شعاعی:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r}) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \gamma \times \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] - \frac{\gamma}{3} \mu \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right] \quad (2)$$

با توجه به این که معادلات حاکم بر حرکت سیال، بسیار پیچیده و غیرخطی هستند، امکان حل دقیق آن‌ها میسر نبوده و استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای حل آن‌ها لازم می‌باشد. کلیه روش‌های حل عددی معادلات، از استراتژی تقریباً یکسانی استفاده می‌کنند. ابتدا فضای محاسباتی که جریان در آن مورد تحلیل قرار خواهد گرفت، به تعداد زیادی المان هندسی، که شبکه نامیده می‌شوند، تقسیم می‌شود. سپس معادلات حاکم بر جریان با روش مناسب گسسته‌سازی می‌شوند. آنگاه گرادینان‌ها و شارها گسسته‌سازی شده و با روش‌های استاندارد که مناسب مسئله مورد نظر هستند، محاسبه شده و در معادلات جای‌گذاری می‌شوند. نهایتاً مسئله با استفاده از روش تکرار حل شده و مجهولات در کل ناحیه حل به دست می‌آیند.

معادله تکانه زاویه‌ای:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{uv}{r}) = \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{\gamma}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \right) \right] \quad (3)$$

معادله تکانه محوری:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] - \frac{\gamma}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (4)$$

معادله انرژی:

$$\rho \frac{\partial I}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial I}{\partial r} + w \frac{\partial I}{\partial z}) = -p \left[\frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{k}{c_v r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial I}{\partial r} \right) + \frac{k}{c_v} \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} - \frac{\gamma}{3} \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial ru}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \mu \left[\gamma \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \gamma \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \gamma \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \gamma \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial r} + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 - \frac{\gamma^* \nu}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \left(\frac{\nu}{r} \right)^2 \right]$$

معادله حالت گاز ایده‌آل:

$$p = (\gamma - 1) \rho I, \gamma = \frac{c_p}{c_v}, I = c_p T \quad (6)$$

حل این معادلات نیاز به حل‌گر مناسب دارد. حل‌گر (rhoCentralFoam) یک حل‌گر تراکم‌پذیر بر مبنای چگالی^۱ می‌باشد که به صورت صریح^۲ به حل معادلات می‌پردازد. در این حل‌گر ابتدا معادله پیوستگی حل شده و با حل آن، مقدار جدید چگالی به دست می‌آید. بعد از آن معادله تکانه در دو قسمت حل می‌شود که قسمت اول به صورت معادله غیرویسکوز حل شده و مقدار سرعت به روز گردیده و بعد از آن قسمت ویسکوز به آن اضافه می‌گردد. معادله انرژی ابتدا بدون نفوذ حرارتی حل گردیده و هنگامی که دمای به روز شده محاسبه شد، قسمت دوم معادله انرژی یعنی همان نفوذ حرارتی اضافه می‌گردد و دمای به روز شده در گام زمانی جدید به دست می‌آید. بعد از محاسبه دما، فشار براساس دمای به روز شده جدید و با استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل، محاسبه می‌شود. بدین ترتیب این مراحل به صورت تکرار انجام می‌شوند تا همه مقادیر خصوصیات جریان به صورت دقیق به دست آید.

در این معادلات p, I, w, v, u, ρ به ترتیب چگالی گاز، سرعت شعاعی، سرعت زاویه‌ای، سرعت محوری، انرژی داخلی و فشار می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل متقارن

1. Density Based
2. Explicit

۱.۲ شرایط مرزی و اولیه

در این مطالعه به دلیل بهبود حل مسئله از شبکه‌بندی ساختار یافته استفاده می‌گردد. نحوه شبکه‌بندی بدین ترتیب انجام شده است که در موقعیت‌هایی که تغییرات شدیدی در خصوصیات جریان رخ می‌دهد، از سلول‌های ریزتر و در موقعیت‌هایی که تغییر خصوصیات جریان کم‌تر است، از سلول‌های بزرگ‌تر استفاده می‌گردد. با توجه به این نکته، در کنار دیواره و کپ‌های بالا و پایین از سلول‌های ریزتری استفاده شده است.

در شکل ۲ هندسه و شبکه‌بندی در نمای $\Gamma-\theta$ و $\Gamma-Z$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، هندسه در راستای θ یک سلول زده شده و در جهت Γ ابعاد سلول‌ها به سمت دیواره ریزتر شده است. در شکل سمت چپ برای نمایش بهتر، شبکه‌بندی قسمت پایین روتور به صورت بزرگ‌نمایی نشان داده شده است.

پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی سانتریفیوژ مدل در جدول ۲ برای گاز هگزا فلوراید اورانیم ارائه شده است. شرایط اولیه برای میدان سرعت صفر، برای دما ۳۱۰ کلوین و برای فشار ۱۱۰ پاسکال به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه حالت گاز ایده‌آل و دما و فشار اولیه در نظر گرفته شده، جرم اولیه درون روتور ۰/۳۹ گرم محاسبه می‌گردد.

۴. نتایج و بحث

۴.۱ اعتبارسنجی شبیه‌سازی کامپیوتری با اپن فوم

۴.۱.۱ مقایسه نتایج با شبیه‌سازی سایر مقالات

در روش حاضر از حل‌گر rhoCentralFoam موجود در نرم‌افزار اپن فوم استفاده شده است. این حل‌گر معادلات ناویراستوکس را به صورت غیرخطی حل می‌کند. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی حاضر لازم است نتایج با سایر روش‌ها مقایسه گردد. برای این کار دو حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول مقایسه با نتایج موجود در مقالات، در حالت بدون ورود و خروج جریان که باعث به وجود آمدن دیدگاه مناسبی نسبت به چگونگی توزیع متغیرهای جریان می‌شود. حالت دوم مقایسه شبیه‌سازی حاضر با شبیه‌سازی انجام گرفته در نرم‌افزار فلوئنت با فرض این‌که شرایط هندسی و مرزی کاملاً مشابه با یک‌دیگر در نظر گرفته شود.

در این‌جا لازم است نوع شرایط مرزی در نظر گرفته شده بیان گردد. هنگام رقیق شدن جریان و دور شدن از نواحی پیوسته، برای افزایش عملکرد روش CFD از شرط مرزی لغزش استفاده می‌گردد. به دلیل این‌که در مسئله حاضر تنها بر روی دیواره روتور ناحیه کاملاً پیوسته ایجاد شده و سایر مرزها در نواحی رقیق قرار دارد، بنابراین از شرط مرزی لغزش استفاده شده است. بدین‌منظور در جدول ۱ انواع شرط مرزی به کار گرفته شده در حل معادلات حاکم بیان شده است.

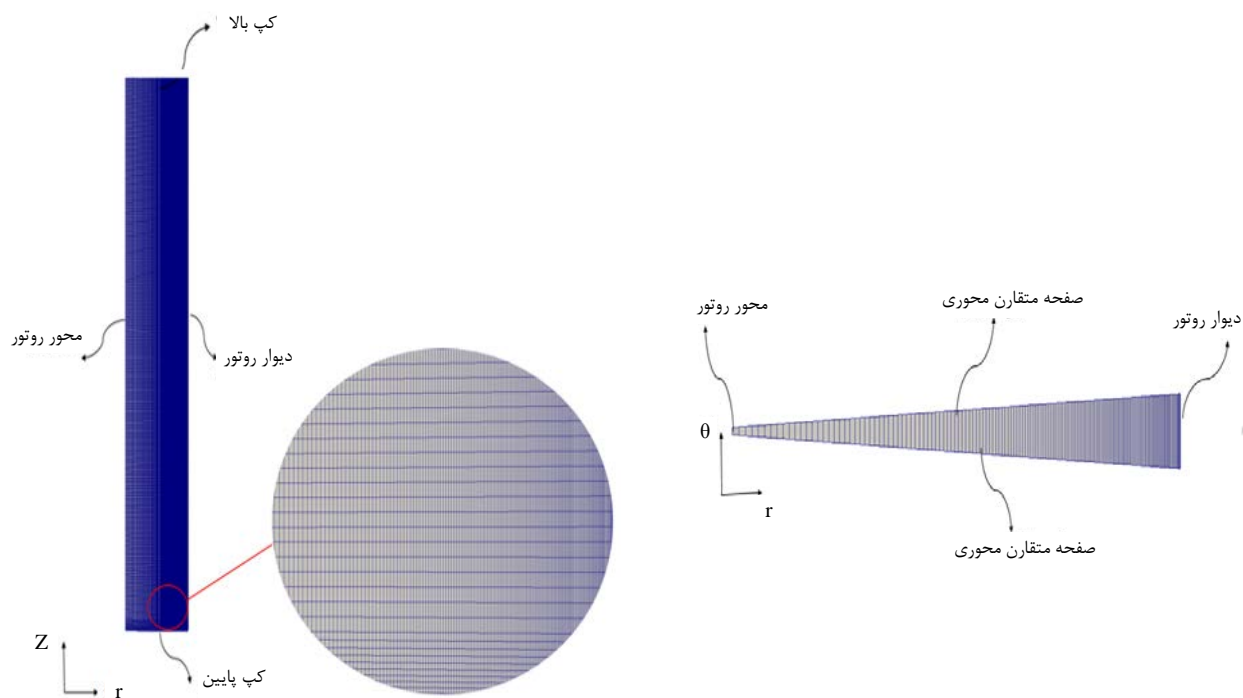
در جدول بالا Ω سرعت زاویه‌ای روتور و $f(Z)$ تابعی از ارتفاع روتور است که در مسئله حاضر به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. شرایط اولیه برای میدان سرعت صفر، برای دما مقدار ثابت و برای فشار هم مقدار ثابت و یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به رابطه حالت گاز ایده‌آل و دما و فشار اولیه در نظر گرفته شده، جرم اولیه درون روتور مقدار ثابتی محاسبه می‌گردد.

۴.۲ تشریح مسئله

مسئله حاضر، شبیه‌سازی جریان گاز درون یک سانتریفیوژ مدل می‌باشد که به صورت یک استوانه دوار در حالت متقارن محوری در نظر گرفته می‌شود. در نرم‌افزار اپن فوم برای اعمال شرط مرزی تقارن محوری، دو صفحه متقارن باید زاویه‌ای کم‌تر از ۵ درجه داشته و ارتباط دو صفحه متقارن محوری با یک‌دیگر فقط با یک سلول انجام گیرد. از این‌رو قطاعی با زاویه ۴ درجه شبیه‌سازی شده و تنها یک سلول در راستای θ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. شرایط مرزی در حل مسئله

مرز	شرط مرزی دما	شرط مرزی سرعت
محور روتور $r = r_1$	$T = \text{const}$	لغزشی
دیوار روتور $r = a$	$T = f(Z)$	$V = a\Omega$
کپ بالا $Z = H$	$T = \text{const}$	لغزشی
کپ پایین $Z = 0$	$T = \text{const}$	لغزشی



شکل ۲. هندسه و شبکه‌بندی مسئله در نمای $r-\theta$ و نمای $r-Z$

جدول ۲. پارامترهای شبیه‌سازی سانتریفیوژ مدل

پارامتر	پارامتر	پارامتر	پارامتر
۵۶۵۰ (rad/sec)	سرعت زاویه‌ای (Ω)	۹۰ (mm)	شعاع روتور (r)
۱٫۰۶	نسبت گرمای ویژه $\gamma = \frac{C_p}{C_y}$	۱۱۰۰ (mm)	ارتفاع روتور (H)
۰٫۹۶	عدد پرناتل (Pr)	۳۵۲ (g/mol)	جرم مولکولی گاز (M)
۳۷۸ (j/kg.K)	ضریب گرمای ویژه (C_p)	۳۱۰ (K)	دمای متوسط (T_0)
۵e-۱/۸ (pa.sec)	لزجت (μ)	۲۰ (K)	گرادیان دمای خطی

می‌شود. تفاوت مطالعه حاضر با مطالعه اولاندر در این است که معادلات اونساگر با در نظر گرفتن ساده‌سازی‌ها در جمله‌های معادلات و فرضیات در شرایط مرزی حل می‌گردد در حالی که در مطالعه حاضر، معادلات ناویراستوکس به‌صورت کامل حل شده، از جمله‌های آن صرف‌نظر نمی‌گردد و شرایط مرزی به‌صورت واقعی اعمال می‌گردد.

برای ارزیابی مدل حاضر و بررسی قابلیت‌های اپن‌فوم، نتایج آن با نتایج حاصل از حل تحلیلی مقایسه شده است. در شکل ۳ نمودارهای مربوط به توزیع شار جرمی محوری شبیه‌سازی شده با اپن‌فوم با نتایج شبیه‌سازی شده توسط اولاندر [۱۹] در مقطع میانی روتور ($Z/H=0.5$) مقایسه شده است. همچنین این مقادیر برای مقاطع پایینی ($Z/H=0.25$) و بالایی

ابتدا برای حالت اول نتایج موجود در مقالات برای دو روش با حل تحلیلی (اونساگر) که توسط اولاندر و حل عددی (اختلاف محدود) که توسط هارادا انجام شده، ارایه گردیده است [۱۹، ۲۰]. روش اول روش تحلیلی است که با استفاده از معادله اونساگر به تحلیل جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که معادله اونساگر، معادله دیفرانسیل پاره‌ای مرتبه ۶ است که نسبت به شعاع درجه ۶ و نسبت به ارتفاع درجه ۲ است و بنابراین به ۶ شرط مرزی شعاعی و ۲ شرط مرزی محوری نیاز دارد. روش کلی حل برای این معادله، روش جداسازی متغیرها است [۲۱]. معادله اونساگر تنها در ناحیه استوارتسون صادق است و اثر لایه اکمن در قالب دو شرط مرزی در بالا و پایین روتور اعمال

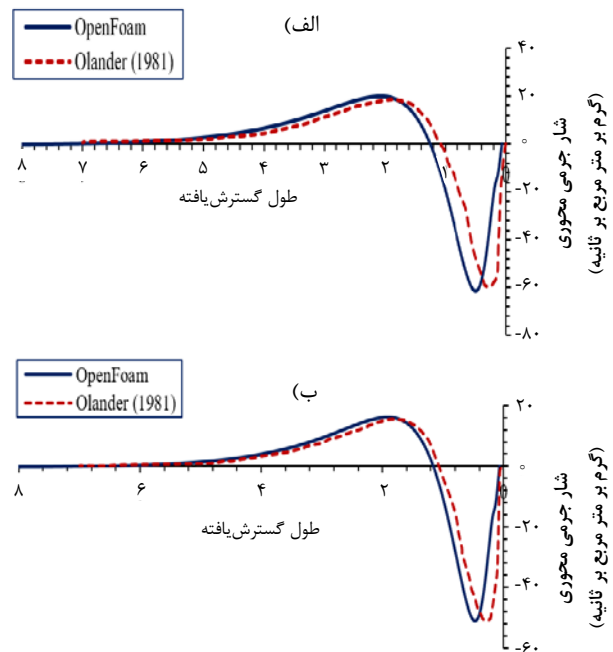
هم‌چنین در ادامه به‌منظور مقایسه مطالعه حاضر با نتایج موجود در مقالات، از نتایج شبیه‌سازی عددی (اختلاف محدود) که توسط هارادا انجام شده، استفاده گردیده است [۲۰]. روش مورد استفاده توسط هارادا روشی است که در آن معادلات پیوستگی، تکانه، انرژی و معادله حالت گاز ایده‌آل به‌صورت عددی و با استفاده از روش اختلاف محدود حل می‌گردد. هارادا با اعمال شرایط محرک دمایی (شکل ۴) در حالت بدون ورود و خروج جریان، شبیه‌سازی جریان درون روتور را انجام داده است. قابل ذکر است برای ایجاد محرک دمایی از مقیاس $\Delta T / T_0 = 3.125 \times 10^{-2}$ استفاده شده است. در این مرجع ابعاد به‌صورت بدون بعد گزارش شده به‌طوری‌که دما با دمای متوسط و سرعت محوری با سرعت خطی دیواره بدون بعد شده است. هم‌چنین ایشان فرض نموده‌اند که در ناحیه مرکزی روتور و تا فاصله ۳۰ درصد محور روتور در جهت شعاعی، ناحیه خلاء وجود داشته باشد.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود برای محرک دمایی، اختلاف دما بر روی کپ پایین و بالا و هم‌چنین روی دیواره روتور اعمال شده است.

چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، سرعت محوری جریان در اثر اعمال محرک دمایی، قابل مشاهده و مقایسه می‌باشد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، شبیه‌سازی حاضر با استفاده از این فوم به خوبی روند تغییرات سرعت محوری جریان با شعاع را پیش‌گویی کرده و انطباق قابل‌قبولی با نتایج شبیه‌سازی انجام شده توسط هارادا دارد. اختلاف کم مشاهده شده در نتایج شبیه‌سازی حاضر با مطالعه هارادا می‌تواند ناشی از فرضیات به کار رفته در مطالعه هارادا، از جمله فرض خلاء در ۳۰ درصد از شعاع روتور، باشد. هم‌چنین در مطالعه حاضر روش عددی حجم محدود به کار رفته است؛ در صورتی‌که در مطالعه هارادا روش اختلاف محدود استفاده شده است. سایر پارامترهای مطالعه حاضر مطابق جدول ۲ و هر دو مطالعه در ماخ ۴ انجام شده است. برای مقایسه نتایج مطالعه هارادا با نتایج مطالعه حاضر، تمامی ابعاد به‌صورت بدون بعد ارائه می‌گردد.

($Z/H=0.75$) نشان داده شده است (نمودار در مقطع بالایی روتور $Z/H=0.75$ بعلت تقارن نسبت به مقطع میانی کاملاً مشابه و منطبق با شار جرمی محوری در مقطع پایینی $Z/H=0.25$ می‌باشد). با مقایسه نتایج دو مطالعه، دقت شبیه‌سازی انجام گرفته با نرم‌افزار این فوم قابل‌قبول بوده و صحت شبیه‌سازی حاضر قابل مشاهده می‌باشد. در این مطالعه روتور به طول ۳۳۵ cm، شعاع ۹/۱۵ cm و با شرایط فشار دیواره ۱۰۰ Torr، سرعت خطی دیواره 700 m.s^{-1} ، گرادینان دمای دیواره ۱ درجه و دمای متوسط گاز برابر با ۳۰۰ K در نظر گرفته شده است [۱۹]. با توجه به فشار دیواره ذکر شده، جرم گاز درون روتور برابر با ۵ g می‌باشد.

در رسم نمودارها از طول گسترش یافته^۱ $(\xi = A^r (1 - \frac{r^r}{a^r}))$ استفاده شده است که در آن A^r پارامتر سرعت $(A^r = \frac{\Omega^r a^r}{\gamma^* RT_0})$ و شعاع دیواره روتور، شعاع، T_0 دمای متوسط گاز، M جرم مولکولی گاز، Ω سرعت زاویه‌ای و R ثابت جهانی گازها می‌باشد.



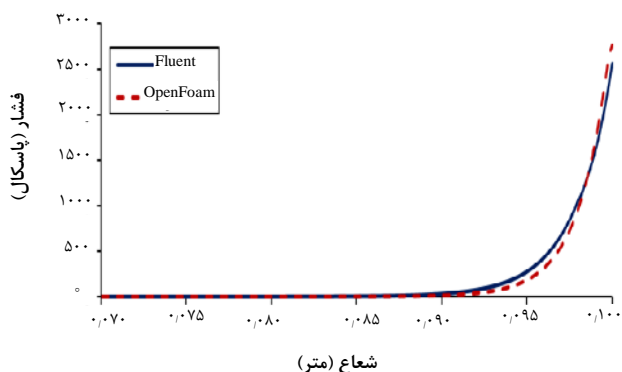
شکل ۳. مقایسه تغییرات شار جرمی محوری در روتور با استفاده از روش مطالعه حاضر با نتایج اولاندر [۱۹] (الف) در ارتفاع $Z/H=0.75$ (ب) در ارتفاع $Z/H=0.75$ و $Z/H=0.25$

1. Scale Heights

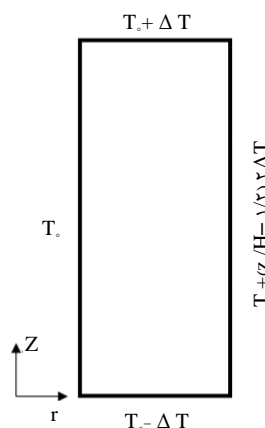
برخی از ضرایب آن متفاوت می‌باشد. تمامی پارامترهای شبیه‌سازی، شرایط مرزی و شرایط اولیه در دو روش مطابق جدول ۲ به صورت مشابه در نظر گرفته شده است.

در شکل ۶ نمودار توزیع فشار در راستای شعاعی در ارتفاع میانی روتور ($Z = 0.5 \text{ m}$) درون روتور رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، فشار به صورت نمایی افزایش یافته است. با مقایسه نمودارهای به دست آمده از دو روش، دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته با این فوم در مقایسه با شبیه‌سازی انجام گرفته با فلونت مشخص و قابل قبول می‌باشد. همچنین در شکل ۷ نمودارهای توزیع شار جرمی محوری بر حسب شعاع در ارتفاع میانی روتور ($Z = 0.5 \text{ m}$) با استفاده از دو روش حل عددی و فلونت ارزیابی و مقایسه شده‌اند. به دلیل این‌که مقادیر شار جرمی محوری در ناحیه مرکزی روتور ثابت و نزدیک صفر است، برای نمایش بهتر نمودارها از شعاع 0.086 m به بعد رسم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی با دو روش مذکور نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده برای شار جرمی محوری اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد.

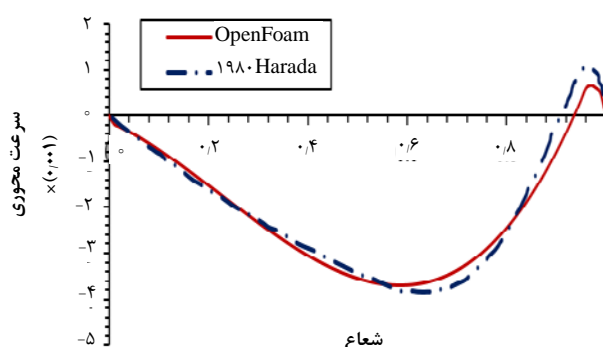
چنان‌که از شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ با دو روش حل عددی با این فوم و فلونت نشان داد که علی‌رغم متفاوت بودن روش گسسته‌سازی در این روش، نتایج به یکدیگر نزدیک بوده و روش مطالعه حاضر با این فوم از دقت خوبی برخوردار است. همچنین ذکر این نکته ضروری است که نرم‌افزار این فوم قابلیت حل ناحیه مولکولی و توسعه حل گر را دارا می‌باشد. در حالی‌که در نرم‌افزار فلونت این قابلیت وجود نداشته و نمی‌توان آن را توسعه داد.



شکل ۶. تغییرات فشار در راستای شعاعی در ارتفاع میانی روتور.



شکل ۴. شرایط مرزی محرک دمایی اعمال شده در مطالعه هارادا [۲۰].

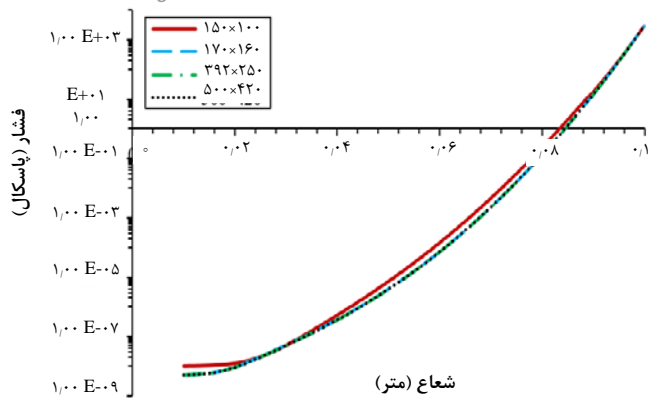


شکل ۵. مقایسه تغییرات سرعت محوری در ارتفاع میانی روتور ($Z = 0.5 \text{ m}$) با استفاده از روش مطالعه حاضر با نتایج هارادا [۲۰].

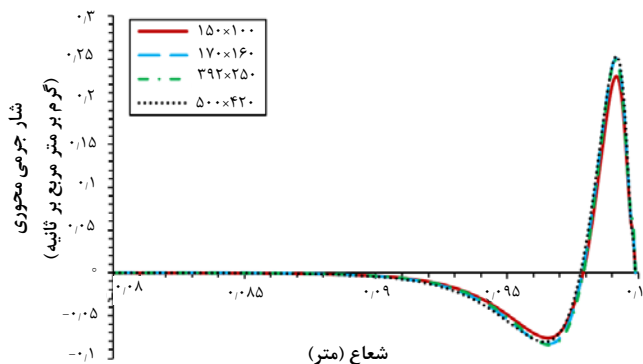
۲.۱.۴ مقایسه نتایج با شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلونت

اعتبارسنجی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر به روش این فوم و با نتایج شبیه‌سازی حاصل از حل عددی با نرم‌افزار فلونت در شرایط مرزی و هندسی یکسان نیز انجام گردید. تفاوت دو روش در این است که حل عددی فلونت براساس روش حجم محدود، حل گر پایایی بر پایه چگالی و با استفاده از روش رو (roe) گسسته‌سازی و حل معادلات انجام شده است، در صورتی‌که حل عددی حاضر با استفاده از نرم‌افزار این فوم براساس روش حجم محدود، حل گر گذرای بر پایه چگالی و با استفاده از روش کورگانو-تادمور^۱ گسسته‌سازی شده و حل معادلات انجام شده است. با وجود آن‌که در هر دو نرم‌افزار از روش حجم محدود استفاده شده است، برای گسسته‌سازی جمله‌های شار روی سطوح المان‌ها از روش‌های متفاوتی استفاده شده است که در آن فرم شکستگی جمله‌های شار و

1. Kurganov-Tadmor

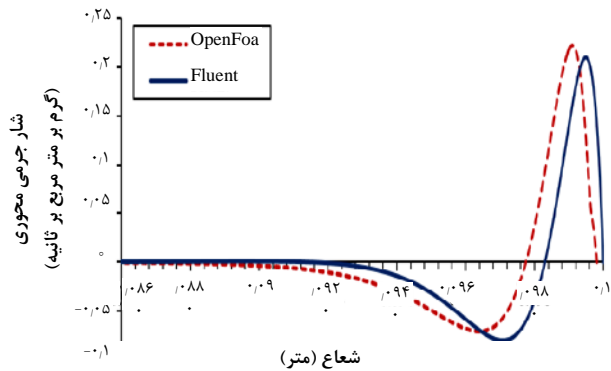


شکل ۸. تغییرات فشار لگاریتمی در راستای شعاعی در ارتفاع میانی روتور.



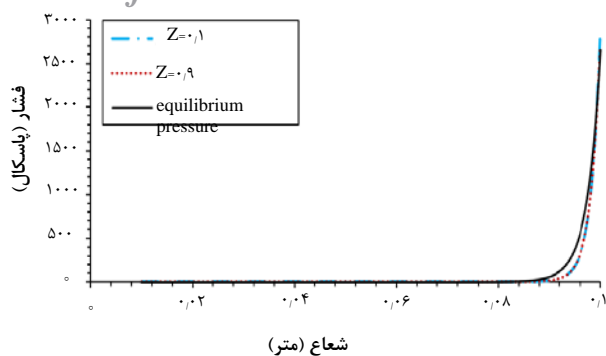
شکل ۹. تغییرات شار جرمی محوری در راستای شعاعی در ارتفاع میانی روتور.

با توجه به نمودارهای به دست آمده مشخص گردید که با افزایش تعداد سلول‌ها، اختلاف نمودارها با یکدیگر کاهش یافته است، به طوری که بیشینه اختلاف نمودارها بین دو حالت اول و دوم حدود ۹ درصد و بین حالت‌های دوم، سوم و چهارم کم‌تر از یک درصد می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سلول‌ها نمودارها با دقت خوبی به یکدیگر نزدیک شده و تفاوتی در دقت نتایج حاصل نمی‌گردد و نتایج از شبکه مستقل شده‌اند؛ بنابراین تعداد سلول 170×160 به عنوان شبکه‌بندی مطلوب برای شبیه‌سازی‌های بعدی انتخاب شد و نیازی به استفاده از تعداد سلول‌های بیشتر و متحمل شدن هزینه محاسباتی بالاتر وجود ندارد. با انتخاب شبکه‌بندی چهارم مطلوب، زمان شبیه‌سازی حاضر با استفاده از یک سیستم چهار هسته با قدرت پردازش 4.2 GHz حدود ۱۰ روز می‌باشد. برای کاهش زمان محاسبات می‌توان از سیستم با تعداد هسته‌های بیشتر به صورت موازی بهره برد. شبیه‌سازی انجام گرفته مطابق پارامترهای موجود در جدول ۲ می‌باشد.



شکل ۷. تغییرات شار جرمی محوری در راستای شعاعی در ارتفاع میانی روتور.

۲.۴ بررسی استقلال از شبکه در شبیه‌سازی به روش اپن فوم به‌طور کلی یکی از پارامترهایی که ممکن است در نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی به جواب واقعی مؤثر باشد، اندازه سلول‌های شبکه می‌باشد. برای اطمینان از درستی نتایج و عدم وابستگی نتایج شبیه‌سازی به ابعاد سلول‌ها، لازم است استقلال از شبکه بررسی گردد. برای این کار هندسه مسئله در هر مرحله با سلول‌های کوچک‌تر شبکه‌بندی می‌گردد تا جایی که با کوچک‌تر شدن سلول‌ها، جواب مسئله تغییر نکند. به‌طور کلی اگرچه با کوچک‌تر شدن اندازه سلول‌ها در یک شبکه‌بندی، نتایج شبیه‌سازی دقیق‌تر می‌شوند، اما از یک حد آستانه‌ای به بعد کوچک‌تر شدن اندازه سلول‌ها دیگر تأثیر قابل‌توجهی بر روی دقت نتایج شبیه‌سازی نداشته و فقط منجر به افزایش زمان اجرا و در نتیجه افزایش هزینه‌های محاسبات کامپیوتری می‌شود. بنابراین ضروری است این حد آستانه با آزمایش استقلال از شبکه تعیین شود. در مسئله حاضر، برای بررسی استقلال از شبکه چهار حالت با تعداد سلول‌های متفاوت با یکدیگر مقایسه شده است. تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده در جهت شعاعی و محوری به ترتیب برابر با 150×100 ، 170×160 ، 392×250 و 500×420 در نظر گرفته شده است. در شکل ۸ نمودارهای توزیع فشار و در شکل ۹ نمودارهای مربوط به شار جرمی محوری در ارتفاع میانی روتور ($Z = 0.05 \text{ m}$) برای شبکه‌بندی‌های متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تغییرات فشار درون روتور سانتریفیوژ.

۲.۳.۴ تغییرات دما نسبت به شعاع

از دیگر ویژگی‌های جریان متغیر، دما می‌باشد که توانایی مدل برای شبیه‌سازی آن باید ارزیابی گردد. در این جا تغییرات دما درون روتور در شرایط فشار دیواره برابر با ۲۷۰۰ Pa و سرعت خطی دیواره برابر با $565 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ نشان داده شده است. قابل ذکر است دمای کپ بالا ثابت و برابر با ۳۲۰ K، دمای کپ پایین ثابت و برابر با ۳۰۰ K و هم‌چنین دمای دیواره روتور به صورت خطی از ۳۰۰ تا ۳۲۰ K تغییر کرده است. دیگر پارامترهای شبیه‌سازی به کار رفته مطابق جدول ۲ می‌باشد. در شکل ۱۱ نمودار تغییرات دما در راستای شعاعی در قسمت پایینی ($Z = 0.1 \text{ m}$) و قسمت بالایی روتور ($Z = 0.9 \text{ m}$)، به‌طوری‌که تغییرات دما ناشی از اختلاف دمای بین کپ بالا و پایین روتور کاملاً مشخص باشد، نشان داده شده است. در قسمت بالایی روتور یا همان کپ گرم‌تر بیشینه دمای گاز به ۳۷۵ K رسیده و در قسمت پایینی یا همان کپ سردتر بیشینه دمای گاز به ۳۶۴ K رسیده است. از علل افزایش دما درون روتور می‌توان به فرایند تراکم‌پذیری و اتلافات ویسکوز در لایه‌های گاز اشاره کرد. این افزایش دما توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است. هارادا در مطالعه خود [۲۰] این افزایش دما را در حدود ۲۰ درصد گزارش نموده و نشان داده که اتلافات ویسکوز سهم بیش‌تری در افزایش دما دارد.

۳.۳.۴ تغییرات سرعت نسبت به شعاع

یکی دیگر از پارامترهای جریان متغیر سرعت می‌باشد که باید توانایی مدل برای شبیه‌سازی این ویژگی ارزیابی گردد. بدین‌منظور پارامترهای مدل مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. به‌علت وجود محرک‌های دمایی در شبیه‌سازی

۳.۴ ارزیابی توانایی مدل برای پیش‌بینی دما، فشار و سرعت

۱.۳.۴ تغییرات فشار نسبت به شعاع

بعد از اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، می‌توان به ارزیابی توانایی مدل برای محاسبه متغیرهای جریان پرداخت. یکی از خصوصیات جریان، فشار می‌باشد. لازم به ذکر است رابطه توزیع فشار تعادلی به‌صورت نمایی و با فرض چرخش صلب برقرار است. به‌عبارت دیگر در این شرایط فقط سرعت زاویه‌ای وجود دارد و سرعت محوری و شعاعی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. رابطه فشار تعادلی طبق رابطه زیر می‌باشد [۱]:

$$P(r) = P(a) * \exp\left(\frac{M \Omega^2 a^2}{\gamma * RT_0} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)\right) \quad (7)$$

که در این رابطه M جرم مولکولی گاز، R ثابت جهانی گازها، T_0 دمای متوسط گاز، a شعاع روتور و Ω سرعت زاویه‌ای روتور می‌باشد. بنابراین طبق رابطه مذکور انتظار می‌رود که تغییرات فشار به دست آمده برای مسئله حاضر به‌صورت نمایی از محور تا دیواره در جهت شعاعی افزایش یابد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، فشار از محور تا دیواره روتور به‌صورت نمایی افزایش یافته است که بیان‌گر روند صحیح انجام شبیه‌سازی می‌باشد. هم‌چنین تغییرات فشار در جهت شعاعی در دو مقطع در قسمت پایینی روتور ($Z = 0.1 \text{ m}$) و در قسمت بالایی آن ($Z = 0.9 \text{ m}$) رسم گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در قسمت بالای روتور، فشار در کنار دیواره ۲۶۹۰ پاسکال و در قسمت پایینی روتور، فشار کنار دیواره برابر با ۲۸۳۰ پاسکال خواهد شد. با توجه به این که رابطه فشار مستقل از ارتفاع می‌باشد، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اپن‌فوم برای تغییرات فشار در قسمت پایینی و بالایی روتور هم تفاوت چندانی با یک‌دیگر نداشته و مستقل از ارتفاع روتور می‌باشند که خود بیان‌گر توانایی اپن‌فوم برای شبیه‌سازی جریان درون روتور سانتریفیوژ می‌باشد. شبیه‌سازی انجام گرفته مطابق پارامترهای موجود در جدول ۲ می‌باشد. در حالی که در شرایط واقعی، سرعت محوری وجود دارد و این خود باعث بروز اختلافاتی بین فشار تعادلی و فشار به دست آمده می‌گردد.

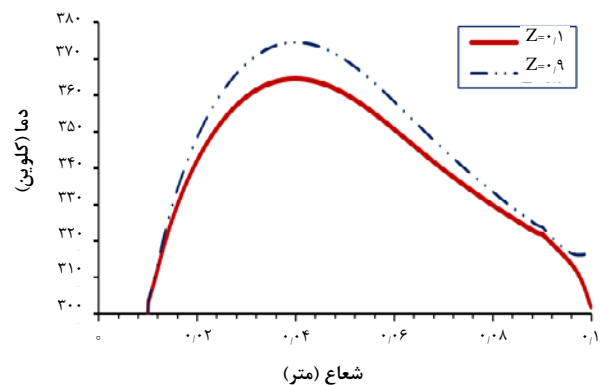
۴.۳.۴ تغییرات شار جرمی

از دیگر ویژگی‌های جریان، شار جرمی محوری است که توانایی مدل برای ارزیابی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۳ شار جرمی محوری در راستای شعاعی و در ارتفاع‌های مختلف از روتور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، شار جرمی محوری در قسمت میانی روتور نسبت به قسمت‌های انتهایی روتور دارای مقادیر بیش‌تری خواهد بود. با توجه به این‌که در همه نمودارها یک نقطه بیشینه مثبت (جریان به سمت بالا) و یک نقطه کمینه منفی (جریان به سمت پایین) وجود دارد، چرخش جریان درون روتور به صورت پادساعت‌گرد خواهد بود. پارامترهای مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی شده مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

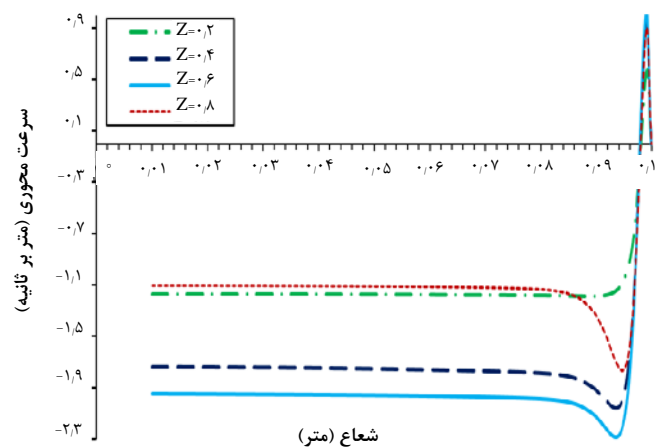
۴.۴ ارزیابی توانایی مدل برای شبیه‌سازی جریان گاز در سرعت‌های مختلف روتور

به‌منظور بررسی توانایی‌های نرم‌افزار اپن فوم برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ، مسئله حاضر در سرعت‌های متفاوت بررسی شده است. بدین‌منظور تغییرات شار جرمی محوری برای سه ماخ ۴٫۵، ۶٫۵ و ۸٫۵ در شرایط اعمال محرک دمایی و مطابق با شرایط داده شده در جدول ۲ برای مقطع میانی روتور رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، جریان محوری به‌خوبی ایجاد شده است که نشان‌دهنده قابلیت اپن فوم برای شبیه‌سازی در جریان‌های با ماخ بالا می‌باشد. با مشاهده نمودارهای به دست آمده مشخص گردید که با افزایش عدد ماخ، جریان محوری به دیواره روتور نزدیک‌تر شده و هم‌چنین مقدار بیشینه آن هم افزایش می‌یابد که کاملاً مشابه نتایج گزارش شده در مطالعات سایر پژوهش‌گران می‌باشد [۱۹].

حاضر، جریان چرخشی درون روتور ایجاد می‌گردد. با بررسی جریان چرخشی می‌توان عملکرد سانتریفیوژ را برای جداسازی ایزوتوپ‌ها تحلیل نمود. از این‌رو بررسی جریان چرخشی و سرعت محوری از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. در شکل ۱۲ نمودار سرعت محوری در جهت شعاعی در ارتفاع‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سرعت در کنار دیواره دارای مقادیر مثبت یعنی جهت به سمت بالا و در فاصله نزدیک‌تر به محور دارای مقادیر منفی یعنی جهت به سمت پایین خواهد بود. هم‌چنین بیشینه مقدار سرعت محوری در قسمت میانی روتور ایجاد خواهد شد و با نزدیک شدن به دو قسمت انتهایی روتور مقادیر سرعت محوری کاهش می‌یابد. واضح است به‌دلیل این‌که در مقطع میانی روتور، قدرت محرک دمایی یعنی اختلاف دمای متوسط گاز با کپ بالا و پایین بیش‌ترین مقدار را دارد، بنابراین مقدار سرعت محوری در این مقطع بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت.

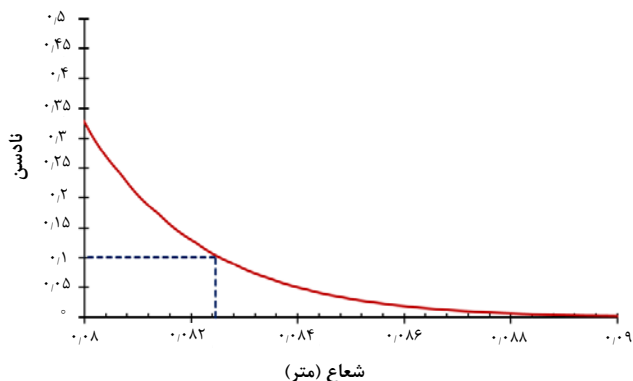


شکل ۱۱. تغییرات دما در دو قسمت پایینی و بالایی روتور.

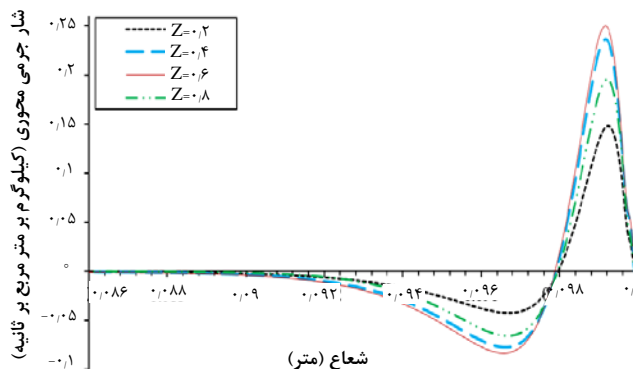


شکل ۱۲. تغییرات سرعت محوری در مقاطع مختلف روتور.

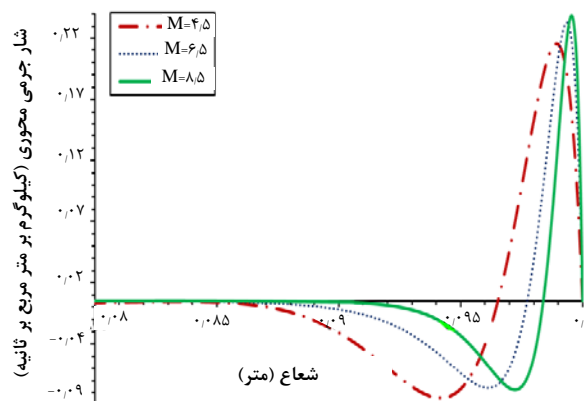
در شکل ۱۵ تغییرات عدد نادسن با شعاع برای مدلی مطابق با شرایط داده شده در جدول ۲ برای مقطع میانی روتور رسم شده است. با توجه به این شکل با مشاهده عدد نادسن ($Kn > 0.1$)، ایجاد شدن ناحیه مولکولی و رقیق در قسمت مرکزی روتور قابل مشاهده می‌باشد و می‌توان محدوده ناحیه پیوسته و ناحیه مولکولی را تشخیص داد ($r > 0.10824m$ محدوده ناحیه پیوسته است). این نتایج نشان می‌دهد که در سانتریفیوژ مدل موردنظر از مرکز تا شعاع $0.10824m$ در ناحیه مولکولی قرار دارد. قابل ذکر است در مطالعات انجام گرفته توسط سایر پژوهش‌گران نیز نتایج مشابه مشاهده شده و به ایجاد ناحیه مولکولی در قسمت مرکزی روتور اشاره شده است [۳، ۲۶]. در برخی از این پژوهش‌ها، برای شبیه‌سازی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ از این ناحیه مولکولی صرف‌نظر شده و فرض شده است که در نواحی مرکزی روتور خلأ کامل وجود دارد. بنابراین به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر با توجه به ناحیه مولکولی به وجود آمده ضروری است ناحیه مولکولی با ابزار دیگری مانند روش DSMC مدل شود. از این رو یکی از مزیت‌های نرم‌افزار اپن‌فوم نسبت به نرم‌افزار فلوئنت و سایر مدل‌های موجود در مطالعات دیگر این است که قابلیت حل ناحیه مولکولی و کوپل دو ناحیه پیوسته و مولکولی در نرم‌افزار اپن‌فوم وجود دارد که از آن در کارهای بعدی بهره‌گیری خواهد شد.



شکل ۱۵. تغییرات عدد نادسن در راستای شعاعی در مقطع $Z = 0.5m$.



شکل ۱۳. تغییرات شار جرمی محوری در مقاطع مختلف روتور.



شکل ۱۴. تغییرات شار جرمی محوری در راستای شعاعی در ماک‌های متفاوت.

۵.۴ ارزیابی شرایط مرزی اعمال شده بر شار جرمی محوری

لازم به توضیح است که به دلیل سرعت دورانی بسیار بالای روتور سانتریفیوژ، بخش عمده‌ای از جریان نزدیک دیواره قرار می‌گیرد و پیش‌بینی می‌گردد که در وسط روتور تقریباً فضای خلأ ایجاد شود. در ناحیه نزدیک دیواره فرض پیوستگی برقرار می‌باشد. بنابراین معادلات حاکم بر جریان معادلات ناویراستوکس بوده که با استفاده از روش‌های عددی دینامیک سیالات محاسباتی حل می‌گردد. اگر در ناحیه مرکزی روتور فضای خلأ یا رقیق ایجاد گردد، فرض پیوستگی در این ناحیه برقرار نبوده و استفاده از معادلات ناویراستوکس با خطا همراه خواهد بود. میزان رقیق بودن و فرض پیوستگی جریان با توجه به عدد نادسن ارزیابی می‌گردد. با توجه به مراجع موجود معادلات ناویراستوکس با استفاده از شرط مرزی لغزش، تا عدد نادسن 0.1 قابل اعتبار خواهد بود [۲۲-۲۵].

DSMC موجود در این نرم‌افزار نسبت به توسعه قابلیت‌ها و بهبود دقت نتایج شبیه‌سازی توسط آن در کارهای آتی اقدام نمود.

تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت‌های فنی و مالی شرکت فناوری‌های پیشرفته سازمان انرژی اتمی ایران انجام گرفته است. در این جا لازم است از استاد ارجمند جناب آقای دکتر صفدری و هم‌چنین سرکار خانم مهندس امینی و جناب آقای مهندس ملکوتی نسب به خاطر حمایت‌هایشان تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

1. Soubbaramayer, Centrifugation, *Applied Physics*, 183-244 (1979).
2. P. Omnes, *Numerical and physical comparisons of two models of a gas centrifuge*, *Computers & Fluids*, **36**, 1028-1039 (2007).
3. S. Bogovalov, V. Kislov, I. Tronin, *Impact of the pulsed braking force on the axial circulation in a gas centrifuge*, *Applied mathematics and computation*, **272**, 670-675 (2016).
4. S. Bogovalov, V. Kislov, I. Tronin, *Verification of numerical codes for modeling of the flow and isotope separation in gas centrifuges*, *Computers & Fluids*, **86**, 177-184 (2013).
5. V. Borman, et al, *The computer simulation of 3d gas dynamics in a gas*, In *Journal of Physics: Conference Series*, 751 (2016).
6. J. Hu, C. Ying, S. Zeng, *Overall separation factor in a gas centrifuge using a purely axial flow model*, *Separation Science and Technology*, **40**, 2139-2152 (2005).
7. D.R. Olander, *The theory of uranium enrichment by the gas centrifuge*, *Progress in Nuclear Energy*, **8**, 1-33 (1981).
8. J. Brouwers, *On compressible flow in a gas centrifuge and its effect on the maximum separative power.*, *Nuclear Technology*, **39** (1978).
9. P. Migliorini, *Modeling and simulation of gas centrifuge cascade for enhancing the efficiency of IAEA safeguards*, University of Virginia, 1-158 (2013).
10. T. Kai, *Basic characteristics of centrifuges, (III) analysis of fluid flow in centrifuges*, *Journal of nuclear science and technology*, **14**, 267-281 (1976).
11. Soubbaramayer, J. Lahargue, *A numerical model for the investigation of the flow and isotope concentration field in an ultracentrifuge*, *Computer method in applied mechanic and engineering*, **15**, 259-273 (1978).

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار این فوم شبیه‌سازی جریان گاز اورانیم با عوامل محرک گرادیان دمای دیواره و اختلاف دمای کپ‌ها در حالت جریان برگشتی کامل انجام شد. بررسی استقلال از شبکه در شبیه‌سازی به روش این فوم نشان داد که اندازه شبکه مناسب، تعداد 170×160 سلول در شبکه می‌باشند. در انتها توانایی مدل برای محاسبه تغییرات فشار، دما و سرعت مورد بررسی قرار گرفت. در مورد نمودارهای مربوط به فشار مشاهده گردید که به دلیل نیروی گریز از مرکز، جرم زیادی از گاز در کنار دیواره جمع می‌گردد. به همین علت فشار در راستای شعاعی از مرکز به سمت دیواره به صورت نمایی افزایش یافته است. در مورد نمودارهای مربوط به دما مشاهده گردید دما در محور و دیواره روتور کاهش یافته است. علت آن شرط مرزی دما بر روی دیواره و محور روتور می‌باشد که به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین حرارت از این دو مرز منتقل می‌گردد به طوری که محور و دیواره نقش خنک‌کنندگی پیدا کرده‌اند. هم‌چنین با اعمال محرک گرمایی مشاهده گردید دمای متوسط گاز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مورد نمودارهای به دست آمده برای سرعت و شار جرمی محوری، مشاهده گردید به علت اعمال عوامل محرک گرمایی، چرخش جریان ایجاد شده و جریان در کنار دیواره به سمت بالا و جریان در قسمت مرکزی به سمت پایین حرکت می‌کند. هم‌چنین مشاهده شد مقدار شار جرمی محوری در ارتفاع میانی روتور ($z = 0.5 \text{ m}$) بیشینه می‌باشد که نشان‌دهنده بیشینه شدن قدرت محرک گرمایی در این مقطع از روتور است. ارزیابی توانایی این فوم برای شبیه‌سازی جریان گاز در سرعت‌های مختلف روتور نشان داد که مدل به خوبی قادر به پیش‌گویی توزیع شار جرمی محوری در سرعت‌های بالای روتور می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی توزیع عدد ناسن نسبت به شعاع نشان داد که مرز بین ناحیه مولکولی و پیوسته در روتور در حدود شعاع 0.10824 m از مرکز روتور قرار دارد.

نتایج ارزیابی توانایی‌های مدل نشان داد که نرم‌افزار این فوم به خوبی قادر به محاسبه تغییرات فشار، دما و سرعت جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ می‌باشد و با توجه به وجود ناحیه مولکولی در درون روتور، می‌توان با کمک نرم‌افزار محاسباتی

12. R.J. Ribanido, *A finite-difference solution of onsager's model for flow in a gas centrifuge*, *Computers & Fluid*, 235-252 (1984).
13. V. Borisevich, O. Morozov, O. Godisov, *Numerical simulation of bellows effect on flow and separation*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **455**, 487-494 (2000).
14. D. Jiang, S. Zeng, *CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge*, *International Conference on Nuclear Engineering*, July, Miami, Florida, USA, 17-20 (2006).
15. "https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/," [Online].
16. C. White, M. Borg, T. Scanlon, *DsmcFoam+: an openfoam based direct simulation monte carlo solver*, *Computer Physics Communications*, **224**, 22-43 (2018).
17. S. Chun, S. Fengxian, X. Xinlin, *Analysis on capabilities of density-based solvers within openfoam to distinguish aerothermal variables in diffusion boundary layer*, *Chinese Journal of Aeronautics*, **26**, 1370-1379 (2013).
18. K. Farber, et al, *Development and validation of a coupled navier–stokes/DSMC simulation for rarefied gas flow in the production process for OLEDs*, *Applied Mathematics and Computation*, **272**, 648-656 (2016).
19. H.G. Wood, J.B. Morton, *Onsager's pancake approximation for the fluid dynamics of a gas centrifuge*, *Fluid Mech.*, **101**, 1-31 (1980).
20. I. Harada, *Computation of strongly compressible rotating flows*, *Journal of Computational Physics*, **38**, 335-356 (1980).
21. C. Ying, H.G. Wood, *Solution of the diffusion equations in a gas centrifuge for separation of multicomponent mixtures*, *Separation Science and Technology*, **31** (1996).
22. F.L. Torre, et al, *Evaluation of micronozzle performance through DSMC, navier-stokes and coupled DSMC/navier-stokes approaches*, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 675-684 (2009).
23. K. Stephani, D. Goldstein, P. Varghese, *A non-equilibrium surface reservoir approach for hybrid DSMC/navier–stokes particle generation*, *Journal of Computational Physics*, **232**, 468-481 (2013).
24. M. Darbandi, E. Roohi, *Applying a hybrid DSMC/navier–stokes frame to explore the effect of splitter catalyst plates in micro/nanopropulsion systems*, *Sensors and Actuators A: Physical*, **189**, 409-419 (2013).
25. K. Farber, et al, *Development and validation of a coupled navier–stokes/DSMC simulation for rarefied gas flow in the production process for OLEDs*, *Applied Mathematics and Computation*, **272**, 648-656 (2016).
26. D. Jiang, S. Zeng, *3D numerical study of a feed jet in a rotating flow-field*, *In Journal of Physics: Conference Series*, **751**, (2016).