بررسی رفتار گاز درون روتور یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از کد DSMC توسعه یافته و حل گر dsmcFOAM

صادق یوسفی نسب^۱، جواد کریمی ثابت^{۲*}، سید جابر صفدری^۱، الهام امینی^۲، علی نوروزی^۲

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران-ایران

۲. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۵۹۳۱، تهران-ایران

*Email: jvkarimi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۲۷

چکیده

برای مدل‌سازی رفتار گاز درون روتور یک ماشین سانتریفیوژ گازی، یک ابزار قدرتمند که به صورت موازی و با سرعت بالا، تمام محدودیت‌های محاسباتی یک ماشین سانتریفیوژ گازی برای اعمال تمامی محرک‌ها شامل اثر خوراک، اثر اسکوپ، اثر بفل و ... را برای تمامی رژیم‌های جریان شکل گرفته پوشش دهد، مورد نیاز است. به همین دلیل دسترسی به یک کد یا نرم‌افزار کاربردی جهت شبیه‌سازی رفتار گاز داخل یک ماشین سانتریفیوژ به نحوی که اثر تمامی عوامل مؤثر بر جداسازی در یک ماشین سانتریفیوژ اعم از چرخش روتور با سرعت بالا، محرک‌های حرارتی و محرک‌های مکانیکی در آن به خوبی لحاظ گردد، ضروری است. با توجه به پوشش دادن روش بر پایه مولکولی DSMC برای تمامی رژیم‌های جریان تشکیل شده در داخل ماشین سانتریفیوژ، در این پژوهش نحوه اعمال تمامی عوامل مؤثر در فرایند جداسازی یک ماشین سانتریفیوژ در مختصات متقارن محوری بر روی کد نوشته شده DSMC و هم‌چنین حل گر dsmcFOAM بیان شده و نتایج به دست آمده از کد از جمله تغییرات شعاعی فشار، شار جرمی محوری و اجزاء سرعت با نتایج به دست آمده از حل گر dsmcFOAM مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از انطباق بالای نتایج کد نوشته شده و حل گر dsmcFOAM برای شبیه‌سازی یک ماشین سانتریفیوژ با حضور تمامی محرک‌های آن می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ماشین سانتریفیوژ، OpenFOAM، کد DSMC، اثر محرک‌ها، جریان داخلی

Investigation gas behavior inside a gas centrifuge using dsmc code developed and dsmcFOAM solver

S. Yousefi nasab¹, J. Karimi sabet^{*1}, J. Safdari¹, E. Amini², A. Norouzi²

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

2. Iran Advanced Technologies Company, AEOL, P.O.Box: 143995-5931, Tehran-Iran

Research Article

Received 7.4.2020, Accepted 17.7.2020

Abstract

To model a gas behavior within a centrifuge machine, a powerful tool is required similarly. With high-speed cover, all the computational limitations for applying the influential derives such as feed, scoop, baffle effects, etc., formed flow regimes. Therefore, achieving an applicable code or software to simulate the gas behavior within a centrifuge machine to investigate the effect of the derives on the separation in a centrifuge machine, including high-speed rotation, temperature, and mechanical derives, is required. Considering the fact of covering the method based on the molecular DSMC for the all formed flow regimes within the centrifuge machine, in the present work, the method of applying the all influential factors in a separation process of a centrifuge machine in the axial symmetric coordinates on the written code of DSMC and also the dsmcFOAM solver have been studies. The results have been compared with those obtained from the code, including pressure radial changes, axial mass flux, velocity components, and dsmcFOAM solver. A good agreement was found between the results corresponding to the written code and dsmcFOAM solver to simulate a centrifuge machine in the presence of all the parameters.

Keywords: Centrifuge machine, OpenFOAM, DSMC code, Derive effects, Internal flow

۱. مقدمه

برای تبدیل جریان شعاعی به جریان محوری و همچنین افزایش جدایش در داخل روتور یک ماشین سانتریفیوژ، از انواع مختلف محرک‌ها، که در اثر وجود آن‌ها سرعت محوری در روتور ایجاد می‌شود، استفاده می‌گردد. انواع مختلف محرک‌ها در یک ماشین سانتریفیوژ شامل محرک ورود و خروج جریان، محرک مکانیکی اسکوپ و بفل، محرک حرارتی دیواره و کپ‌ها می‌باشد [۱].

همان‌طور که اشاره شد، در اثر وجود محرک‌ها سرعت محوری در کل روتور ایجاد می‌شود. در یک ماشین سانتریفیوژ به علت اثر نیروی گریز از مرکز، اکثر جرم در لایه استوارتسون (لایه نزدیک به دیواره روتور) قرار می‌گیرد. اما باید به این نکته توجه کرد که v_z ایجاد شده حتی در ناحیه میانی روتور که ناحیه مولکولی است دارای مقدار بالایی است ولی بخش اعظم رفت و برگشت جریان که دارای حرکت چرخشی است، در لایه استوارتسون اتفاق می‌افتد. به علت نیروی گریز از مرکز تغییرات شدیدی در چگالی جریان داخل روتور ایجاد می‌گردد که این امر موجب تشکیل انواع مختلف رژیم‌های جریان در داخل یک ماشین سانتریفیوژ می‌گردد که از رژیم مولکولی ($kn > 0.1$) تا پیوسته ($kn < 0.1$) را شامل می‌شود. برای مدل‌سازی جریان در ناحیه پیوسته یک روتور از معادلات ناویراستوکس استفاده می‌گردد که در حالت کلی حل تحلیلی آن‌ها ممکن نیست و حل عددی نیز به صرف هزینه و زمان قابل‌توجهی نیاز دارد. از میانه‌های دهه ۵۰ میلادی پژوهشگران روشی را که بر پایه ساده‌سازی و خطی‌سازی معادلات ناویراستوکس بود، برای حل معادله ناویراستوکس توسعه دادند که در آن با استفاده از فرضیات مناسب، ۶ معادله حاکم برای پایداری جرم، پایداری تکانه در راستای شعاعی، محیطی و محوری، پایداری انرژی و معادله حالت با یک‌دیگر ترکیب شده و به یک معادله PDE مرتبه ۶ به نام معادله اونساگر می‌رسید. علت اصلی استفاده از این روش سرعت بالای آن نسبت به روش‌های دیگر و محدودیت در امکانات محاسباتی بود. با پیشرفت سیستم‌های محاسباتی، روش‌های عددی CFD جایگزین روش‌های اونساگر گردیدند. روش دیگری که هم‌زمان با پیشرفت سیستم‌های محاسباتی توسعه پیدا کرد، روش‌های لاگرانژی از جمله روش DSMC بود که با توجه به انتخاب ذرات نماینده، توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های با تعداد زیاد مولکول را دارا می‌باشند. معادله بولتزمن به طور کلی تمامی رژیم‌های جریان را دربرمی‌گیرد ولی حل معادلات آن بسیار مشکل است. به همین دلیل روش DSMC توسط بیرد ارایه گردید [۲، ۳] به گونه‌ای که در صورت انتخاب تعداد ذرات و شبکه‌های مناسب می‌توان حلی از روش DSMC را جوابی از معادله بولتزمن دانست [۴]. در سال ۲۰۰۰ کای به شبیه‌سازی عددی جریان و جداسازی ایزوتوپی در داخل یک ماشین سانتریفیوژ برای گاز SF_6 پرداخت. در این

شبیه‌سازی، اثر اختلاف دمای کپ بالا و پایین و اثر اسکوپ و بفل در محاسبات وارد شده است [۵]. لاهارگو و سوبارامیر نیز به بررسی سرعت محوری برحسب مختصات شعاعی با استفاده از روش‌های خطی شده ناویراستوکس پرداختند و نمودار شارجرمی محوری برای عامل محرک اسکوپ را محاسبه کردند [۶]. پاسکال اومنس در سال ۲۰۰۶ به حل عددی خطی و غیرخطی معادلات ناویر استوکس (اعمال اثر اسکوپ) یک ماشین ایگاچو^۱ پرداخت و اثر نیروی درگ حاصل از اسکوپ را به‌وسیله شرایط مرزی به هندسه اعمال کرد و نمودارهای شارجرمی محوری در مرکز روتور و اغتشاشات دمایی و سرعت چرخشی را برای حل خطی و غیرخطی معادلات ناویراستوکس با یک‌دیگر مقایسه کرد [۷]. پرادهان و کوماران در سال ۲۰۱۱ به شبیه‌سازی کل یک ماشین سانتریفیوژ با روش DSMC و انساگر همگن پرداختند و اثر اعمال گرادیان حرارتی ۱ درجه بر روی دیواره ۳/۳ متری را با هر دو روش در ارتفاع مرکزی روتور مورد بررسی قرار داده و به نتایج مشابهی دست یافتند. همچنین در این مطالعه، شارجرمی محوری درون یک روتور با وجود محرک خوراک با استفاده از روش DSMC مورد بررسی قرار گرفت ولی برداشت گاز فقط به‌صورت چاه جرمی در بالا و پایین روتور لحاظ گردید و اثر چشمه و چاه ممنومی اسکوپ در شبیه‌سازی آن‌ها لحاظ نشده است [۸].

شی-زینگ در سال ۲۰۱۱ به شبیه‌سازی اثر خوراک ورودی به یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش DSMC پرداخت. او نشان داد که خوراک یک نقش اساسی برای جریان رفت و برگشتی درون یک ماشین سانتریفیوژ دارد. همچنین نشان داد که سرعت خوراک ورودی تأثیر به‌سزایی بر چگالی، فشار و سرعت گاز شکل گرفته درون یک ماشین سانتریفیوژ دارد [۹]. جی آنک^۲ نیز در سال ۲۰۱۰ با استفاده از کوپل کردن دو روش DSMC و CFD به شبیه‌سازی رفتار گاز در کل ماشین سانتریفیوژ پرداخت؛ به گونه‌ای که از روش DSMC برای ناحیه رقیق و از روش CFD برای شبیه‌سازی جریان رفت و برگشتی کنار دیواره روتور استفاده کرد [۱۰]. همچنین جی‌آنک و همکارانش به شبیه‌سازی اثر خوراک روی میدان جریان درون یک سانتریفیوژ گازی با روش DSMC پرداختند و نشان دادند که بیش‌ترین سرعت در یک ماشین سانتریفیوژ مرتبط با سرعت خوراک بوده و همچنین نرخ خوراک تأثیر چشمگیری روی توزیع سرعت محوری (شارجرمی محوری) درون یک ماشین سانتریفیوژ دارد [۱۱]. رابلین نیز در سال ۲۰۰۱ به شبیه‌سازی ناحیه مولکولی یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش DSMC پرداخت و اثر سرعت شعاعی و سرعت محوری در ناحیه تزریق خوراک را مورد بررسی قرار داد [۱۲].

1. Igasuu

2. Jiang

۲.۱.۲ عامل محرک‌های مکانیکی

محرک‌های مکانیکی شامل محرک اسکوپ و بفل می‌باشد. در واقع سیالی که دارای سرعت u_θ می‌باشد با اسکوپ ثابت برخورد می‌کند و به دلیل تغییر تکانه، سرعت گاز کاسته می‌شود. هنگامی که گاز در حال کم کردن سرعت است، از طرف ذرات دیگر که در حال چرخش هستند به آن ω القا می‌شود. بنابراین گاز برای کم کردن u_θ مجبور است که در شعاع کم‌تری حرکت کند که باعث ایجاد حرکت شعاعی می‌شود. از طرفی در این‌جا شوکی اتفاق می‌افتد که سرعت و عدد ماخ را تبدیل به فشار می‌کند، در واقع تبدیل تکانه باعث بالا رفتن دما و فشار شده که مجدداً باعث حرکت شعاعی می‌گردد. تمامی این موارد مشابه عامل یک کپ گرم، باعث حرکت شعاعی ذرات رو به محور روتور می‌شوند [۱۴]. عامل خوراک و برداشت گاز از اسکوپ‌های محصول و پسماند واقع در پایین و بالای روتور، به دلیل ایجاد یک جریان محوری درون روتور نیز می‌توانند به عنوان محرک محسوب شوند. پرادها در مقاله خود با اعمال تمامی محرک‌های درون روتور، شار جرمی محوری در مرکز روتور را برای یک ماشین سانتریفیوژ با طول $3/3$ m و سرعت چرخشی 700 m.s^{-1} با استفاده از روش DSMC و اونساگر همگن به صورت شکل ۱ به دست آورد.

با توجه به این‌که ابعاد روتور شبیه‌سازی شده توسط پرادها بسیار بلند است، در پژوهش حاضر به اعتبارسنجی با این مقاله پرداخته نشده است؛ ولی به‌طور کلی این مقاله نشان می‌دهد که DSMC می‌تواند روشی کارآمد برای شبیه‌سازی رفتار گاز درون روتور یک ماشین سانتریفیوژ باشد.

۲.۲ روش DSMC

DSMC یک روش شبیه‌سازی سیالاتی از دیدگاه لاگرانژی است که در آن تعداد زیادی مولکول‌های شبیه‌سازی شده به‌طور هم‌زمان دنبال می‌گردند و علاوه بر برخورد مولکول با سطح، برخوردهای بین مولکولی نیز بررسی می‌شوند. الگوریتم روش DSMC در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل ۱. شار جرمی محوری مرکز روتور به دست آمده از روش DSMC (الف) (O) (ب) اونساگر همگن [۸].

در کنار نرم‌افزارهای تجاری مانند Fluent و CFX که به حل جریان سیال به روش عددی می‌پردازد، نرم‌افزارهای متن باز نیز در این شاخه ارایه شده‌اند که مهم‌ترین مزیت آن‌ها دسترسی به متن کد می‌باشد. در نتیجه می‌توان حل گر و شرایط مرزی موردنظر را مطابق با هندسه مورد شبیه‌سازی تغییر داد و نزدیک‌ترین شرایط شبیه‌سازی را برای هندسه موردنظر به دست آورد. یکی از مهم‌ترین این نرم‌افزارهای متن باز OpenFOAM است که امکان حل گسترده‌ای از پدیده‌های فیزیکی هم‌چون جریان‌های قابل تراکم و غیر قابل تراکم، جریان‌های بر پایه مولکولی، جریان دوفاز، جریان در مواد متخلخل، دینامیک گازها، احتراق، توربو ماشین و ... را دارا می‌باشد. قدرت اصلی OpenFOAM ناشی از استفاده هوشمندانه از توانایی‌های زبان برنامه‌نویسی C++ می‌باشد که به دلیل شیء‌گرا بودن آن، ساختار منظمی از کلاس‌ها، کتابخانه‌ها و به طور کلی اشیاء را فراهم نموده است [۱۳]. در پژوهش حاضر، از حل گر بر پایه مولکولی آن به نام حل گر dsmcFOAM برای شبیه‌سازی جریان گاز درون ماشین سانتریفیوژ استفاده گردیده و طریقه لحاظ کردن اثر هر یک از محرک‌های گرمایی و مکانیکی در داخل ماشین سانتریفیوژ به این حل گر بیان شده است.

۲. تئوری

۲.۱ ایجاد جریان محوری درون روتور

برای تبدیل جریان شعاعی به جریان محوری و هم‌چنین برای افزایش جدایش از انواع مختلف محرک‌ها در داخل یک ماشین سانتریفیوژ استفاده می‌گردد. در حالت کلی انواع محرک‌ها به صورت محرک‌های حرارتی و مکانیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. به دلیل اهمیت موضوع اثر هر یک از محرک‌های مذکور در مقدار جدایش نهایی یک ماشین سانتریفیوژ، در ادامه توضیح مختصری در مورد هر یک از این محرک‌ها بیان می‌گردد.

۲.۱.۲ عامل محرک‌های حرارتی

برای یک ماشین سانتریفیوژ شامل کپ بالا و پایین، سیال در کنار کپ گرم به دلیل تغییر چگالی می‌تواند بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند و حرکت شعاعی داشته باشد. تا زمانی که تعادلی بین نیروهای وارد بر ذرات برقرار شود، حرکت شعاعی رو به محور در کنار کپ گرم ادامه می‌یابد. در کنار کپ سرد، سیال در جهت نیروی گریز از مرکز حرکت می‌کند و دقیقاً از آن جایی که تعادل نیروها به هم خورده بود حرکت شعاعی شروع خواهد شد. حاصل این حرکت شعاعی تبدیل به چرخش محوری می‌گردد. هم‌چنین در صورت اعمال یک گرادیان خطی دمایی بر روی دیواره روتور، به دلیل همرفت طبیعی، سیال از لایه سرد به سمت لایه گرم حرکت می‌کند که پس از چرخش سیال بر اثر نیروی گریز از مرکز یک سیکل بسته تشکیل می‌شود.

شکل ۳. نحوه برخورد و انعکاس ذرات در مدل سرسیگنانی-لمپیس-لرد.

ضرایب تجمع مورد استفاده در شرط مرزی سرسیگنانی-لمپیس-لرد از شبیه سازی دینامیک مولکولی قابل محاسبه است. شبیه سازی دینامیک مولکولی بر اساس حل معادله کلاسیک حرکت (معادلات نیوتن) برای یک مجموعه ای از مولکول ها انجام می گیرد. روش دینامیک مولکولی به جز مرحله ایجاد سرعت های اولیه، در تمامی مراحل حرکت دادن مولکول ها، از روابط احتمالاتی استفاده نمی کند. به همین دلیل این روش به عنوان یک روش شبیه سازی قطعی^۳ معرفی می گردد. MD با یک سرعت اولیه بر اساس یک توزیع ماکسولین مولکول ها را حرکت می دهد و سرعت بعدی مولکول ها را بر اساس معادله انتگرالی^۴ طوری اصطلاح می کند که انرژی سیستم کمینه گردد. در یک شبیه سازی دینامیک مولکولی تغییرات انرژی سیستم تبدیل به شتاب می گردد و سپس بر اساس شتاب، موقعیت بعدی مولکول تعیین می گردد. این گونه مولکول های واقع شده در یک جعبه شبیه سازی حرکت می کنند و در هر مرحله موقعیت، سرعت و انرژی آن ها محاسبه می گردد. اگرچه روش های تجربی برخی اطلاعات مورد نیاز برای وابستگی مقدار ضرایب تجمع به شرایط گاز و جنس دیواره را در اختیار ما قرار می دهند، ولی شبیه سازی دینامیک مولکولی می تواند آگاهی بیش تری را در مورد برهم کنش های فیزیکی گاز-سطح فراهم سازد.

۳.۱ اعمال اثر محرک ها به کد DSMC و حل گر dsmcFOAM
چرخش روتور با سرعت بالا باعث ایجاد یک جداسازی شعاعی و محرک های گرمایی و مکانیکی باعث ایجاد یک جدایش محوری در داخل یک ماشین سانتریفیوژ می گردند. در نتیجه به دلیل اهمیت هر یک از موارد مذکور، در این قسمت به نحوه اعمال هر یک از آن ها به یک کد DSMC و حل گر dsmcFOAM پرداخته می شود.

۳.۱.۱ اعمال اثر خوراک

خوراک تأثیر چشم گیری در توزیع شار جرمی محوری، چگالی جرمی و فشار در داخل روتور یک ماشین سانتریفیوژ دارد [۱۲-۱۵]. در واقع در صورتی که قدرت خوراک از میزان بهینه آن فاصله بگیرد باعث به هم ریختن جریان رفت و برگشتی درون روتور خواهد شد. در صورتی که نرخ جریان خوراک از مقدار بهینه آن بیش تر شود، موجب شکافته شدن جریان

شکل ۲. الگوریتم روش DSMC.

در این الگوریتم کمیت های NPR، NIS و NSP به ترتیب تعداد تکرارها برای به دست آوردن فایل خروجی، تعداد تکرارها بین نمونه گیری و تعداد دفعات نمونه گیری قبل از متوسط گیری از کمیت های میکروسکوپی می باشند.

مدل انتشاری یک مدل مناسب برای مسایل مهندسی می باشد که دارای دقت مناسبی می باشد. در واقع در این مدل مولکول های ورودی تمامی سرعت و دمای دیواره را به خود می گیرند. در شرط مرزی ماکسول^۱ دو نوع برهم کنش طیفی و انتشاری با هم در نظر گرفته می شوند به طوری که برهم کنش طیفی با زاویه ای برابر با زاویه برخورد و برهم کنش انتشاری با زاویه ای تصادفی منعکس می گردند. با توجه به این که احتمال برخورد متناسب با حاصل ضرب سطح مقطع در سرعت نسبی است، در مدل برخورد ماکسول احتمال برخورد برای یک مولکول خاص مستقل از سرعت می باشد. هم چنین در مدل ماکسول ضریب ویسکوزیته به طور خطی با دما ارتباط دارد که این مورد برای گازهای واقعی غیر واقع بینانه می باشد. مدل سرسیگنانی-لمپیس-لرد^۲ زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که زمان تجمع مولکول های ورودی به دیواره نه زیاد و نه کم باشد. در واقع این روش با تعریف ضرایب تجمع تکانه (σ) و انرژی (α) مماسی و نرمال، درصدی از مولکول ها را به صورت انتشاری و باقی مانده را به صورت طیفی از دیواره منعکس می کند. هم چنین در این مدل زاویه انعکاسی تابعی از ضرایب تجمع تکانه مماسی و نرمال می باشد، در نتیجه می توان حالتی واقعی تر از رفتار یک سیال را مدل سازی کرد. شکل ۳ طرح واره های از برخورد ذرات ورودی با یک سطح و نحوه انعکاس آن ها با استفاده از روش سرسیگنانی-لمپیس-لرد را نشان می دهد.

6. Deterministic

4. Integration Equation

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 98, No 1, 2022, P 54-63

1. Maxwell Boundary Condition

2. Cercignani-Lampis-Lord Boundary Condition

مجله علوم و فنون هسته ای

جلد ۹۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۵۴-۶۳

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{\gamma k_B (T_W)}{m}} \quad (2)$$

که T_W و V_W به ترتیب سرعت و دمای دیواره روتور می‌باشند. برای حل گر dsmcFOAM سرعت چرخشی دیواره از طریق استفاده از دستورات زیر به صفحه موردنظر در پوشه boundaryU اعمال می‌گردد.

rotorWall { Type rotatingWallVelocity; axis (0 0 1); origin (0 0 0); omega constant ω_{rotor} ; }

شرط مرزی مورد استفاده برای تمامی سطوح در کد DSMC و حل گر dsmcFOAM از نوع سرسیگنایی- لمپیس- لرد می‌باشد.

۲.۳ اعمال اثر محرک گرمایی گرادیان خطی دمایی روی دیواره همان‌طور که بیان شد، اعمال یک گرادیان خطی روی دیواره روتور می‌تواند باعث ایجاد یک جریان محوری درون روتور گردد. در نتیجه لحاظ کردن اثر این محرک می‌تواند بسیار حایز اهمیت باشد [۱۵]. در کد DSMC اثر این محرک در مقدار محتمل‌ترین سرعت ذرات منعکس شده از دیواره لحاظ گردیده است. در واقع ذرات برخورد کرده با یک دیواره در یک شرط مرزی سرسیگنایی- لمپیس- لرد، با لحاظ کردن درصد انعکاس انتشاری، سرعتی متناسب با دمای دیواره به خود می‌گیرند. در نتیجه برای لحاظ کردن اثر یک گرادیان خطی بر روی دیواره، کافی است که این اثر در مقدار سرعت ذرات منعکس شده از دیواره لحاظ گردد. به‌عنوان نمونه برای اعمال اثر اختلاف خطی ΔT بر روی دیواره می‌توان از دستور زیر استفاده کرد [۱۶]:

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{\gamma k_B (T_W + \frac{\Delta T (X_C)}{Z_m})}{m}} \quad (3)$$

که در این رابطه v_{mp} محتمل‌ترین سرعت، X_C موقعیت ذره و Z_m ارتفاع روتور را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان تأثیر غیرخطی بودن تغییرات دمایی را نیز به دست آورد. به‌عبارتی می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد تا توابع غیرخطی یا دارای یک تابع خاص را به آن اضافه نمود:

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{\gamma k_B (T_W + \frac{C_1 (X_C)}{Z_m} + \frac{C_2 (X_C)^2}{Z_m} + f(z))}{m}} \quad (4)$$

بعد از محاسبه محتمل‌ترین سرعت می‌توان مقادیر سرعت بعد از برخورد را به‌طریق زیر به دست آورد. پس از برخورد با دیواره و انعکاس آن، سرعت و موقعیت جدید یک ذره، وابسته به تعداد ذرات و در نتیجه تعداد برخوردهایی است که با آن‌ها مواجه می‌گردد.

محوری می‌گردد و زمانی که نرخ جریان خوراک ورودی از مقدار بهینه آن کم‌تر باشد، باعث کاهش در توان جداسازی یک ماشین سانتریفیوژ می‌گردد. برای اعمال اثر خوراک به یک کد مولکولی باید در ابتدا مقدار جرم ورودی بر اساس تعداد سلول‌های محفظه ورودی خوراک، به تعداد ذرات شبیه‌سازی تبدیل گردد. در کد DSMC خوراک درنظر گرفته شده جهت ورود گاز به درون روتور سانتریفیوژ با استفاده از رابطه زیر به کد اعمال می‌گردد:

$$\dot{N} = \frac{N_A \dot{m} dt}{MF_N N_{cs}} \quad (1)$$

در رابطه فوق N_A عدد آووگادرو، $\dot{m}$ دبی جرمی ورودی، dt بازه زمانی انتخاب شده برای شبیه‌سازی، M جرم مولکولی گاز انتخابی، F_N ضریب تکثیر (نسبت تعداد مولکول‌های واقعی به ذرات شبیه‌سازی شده) و N_{cs} تعداد سلول‌های ورودی خوراک می‌باشند.

در حل گر dsmcFOAM برای اعمال یک جریان داخلی از طریق یک خوراک می‌توان با رجوع به آدرس زیر، اثر خوراک ورودی به شبیه‌سازی را توسط رابطه ۳ به حل گر اضافه کرد.

openFoam-2.1.x/src/lagrangian/dsmc/submodels/
inflow BoundaryModel/freestream

پس از اعمال این تغییرات در متن اصلی برنامه، باید شرط مرزی مناسب جهت اعمال بهترین ورودی به محیط شبیه‌سازی برای حل با روش DSMC انتخاب گردد [۱۵]. برای این کار می‌توان دستورات زیر را برای شرط مرزی سرعت (U) و صفحه ورودی خوراک در فایل 0 نوشت:

inletWall {Type flowRateInletVelocity;
volumetricflowRate Q; extrapolateProfile yes;
Value uniform (0 0 0);}

در این دستور اثر چگالی جرمی خوراک در volumetricflowRate برحسب $m^3.s^{-1}$ دیده می‌شود.

۲.۳ اعمال اثر سرعت چرخشی به دیواره روتور

در کد DSMC برای اعمال اثر سرعت چرخشی به ذرات برخورد کرده با دیواره روتور، مقدار سرعت چرخشی موردنظر برای دیواره روتور به جزء سرعت چرخشی ذرات منعکس شده از دیواره مطابق با روابط زیر اضافه می‌گردد:

$$\begin{aligned} v_I &= \frac{v_z}{v_{mp}}, & w_I &= \frac{v_\theta}{v_{mp}}, \\ \theta_I &= \arctan(v_I, w_I), & \alpha_I &= \sigma_I (2 - \sigma_I), \\ r_I &= \sqrt{-\alpha_I \log R_\tau}, & \theta &= 2\pi R_\tau \\ v_m &= v_I \sqrt{1 - \alpha_I}, & v_p &= v_m + r_I \cos(\theta) \\ w_p &= r_I \sin(\theta) \\ v_{\theta, new} &= \left(\frac{\sigma_I}{2 - \sigma_I}\right) V_W + v_{mp} (v_p \cos(\theta_I) - w_p \cos(\theta_I)) \end{aligned}$$

اختلاف بین سرعت زاویه‌ای اسکوپ و دیواره ایجاد کرد. با تعریف ضریب β به صورت نسبت اختلاف سرعت زاویه‌ای اسکوپ و روتور به سرعت زاویه‌ای روتور، مقدار سرعت زاویه‌ای اسکوپ مطابق رابطه ۱۱ قابل محاسبه می‌باشد.

$$\omega_{Disk} = (1 - \beta) \times \omega_{rotor} \quad (۷)$$

که $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{rotor}}$ برای لحاظ کردن اثر اسکوپ در کد DSMC می‌توان از رابطه زیر برای سرعت چرخشی ذرات منعکس شده از سطح دیسک فرضی استفاده کرد:

$$V_{\theta, new} = \left(\frac{\sigma_t}{1 - \sigma_t} \right) V_{Disk} \left(\frac{r}{R_D} \right) + V_{mp} (V_p \cos(\theta_t) - w_p \cos(\theta_t)) \quad (۸)$$

در رابطه فوق r موقعیت شعاعی ذره برخوردی با دیسک، R_D ضخامت دیسک و V_{Disk} سرعت چرخشی دیسک فرضی می‌باشد. برای لحاظ کردن اثر اسکوپ در حل گر dsmcFOAM نیز می‌توان در پوشه boundaryU از دستورات زیر برای صفحه دیسک فرضی استفاده کرد:

```
diskWall {Type rotatingWallVelocity; axis
(0 0 1);origin (0 0 0);omega constant  $\omega_{Disk}$ ;
```

به طور مشابه برای لحاظ کردن اثر بفل، با جایگزین کردن مقدار V_{Disk} و ω_{Disk} با مقادیر V_{Baffle} و ω_{Baffle} ، می‌توان از دستورات فوق استفاده کرد.

پس از اعمال تمامی اثرات محرک‌های مذکور به کد DSMC و حل گر dsmcFOAM، می‌توان به شبیه‌سازی رفتار گاز داخل یک ماشین سانتریفیوژ پرداخت.

۴. نتایج

در این مقاله به شبیه‌سازی هندسه یک ماشین سانتریفیوژ با گاز هگزا فلوراید اورانیوم به صورت متقارن محوری با ابعاد $10.8 \times 10.0 \text{ mm}^2$ با استفاده از حل گر dsmcFOAM و کد DSMC پرداخته شده است. در واقع این حل گر و کد برای شبیه‌سازی یک ماشین سانتریفیوژ با اعمال تمامی محرک‌های ایجاد جریان شعاعی و محوری توسعه داده شده است. اسکوپ پسماند در فاصله ۲ سانتی‌متری از کپ بالایی و ۶ میلی‌متری از دیواره روتور قرار گرفته است. اسکوپ محصول نیز در پایین روتور و زیر بفل و در فاصله ۲ سانتی‌متری از کپ پایینی و ۲ میلی‌متری از روتور واقع گردیده است. ضخامت بفل 18 mm و به صورت یک حلقه توپر و سرعت چرخشی دیواره روتور برابر با 560 m.s^{-1} در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی به صورت موازی با ابزار MPI با تعداد ۴۴ هسته و به مدت ۶۰۰ ساعت انجام شده است. شرط مرزی مورد استفاده در تمامی دیواره‌ها، شرط مرزی سرسیگناتی لمپیس لرد با مقدار ضریب تجمع تکانه مماسی برابر با ۰/۹۹ (با توجه به چرخشی بودن تمامی سطوح) و ضریب تجمع تکانه نرمال برابر با ۰/۸۹۵ (به دست آمده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی) انتخاب گردیده است. تعداد

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{V_r}{V_{mp}}, & \alpha_n &= \sigma_n, & r_n &= \sqrt{-\alpha_n \log R_1}, \\ \theta &= 2\pi R_r, & u_m &= u_1 \sqrt{1 - \alpha_n} \\ u_N &= \sqrt{r_n^2 + u_m^2 + 2r_n u_m \cos(\theta)} \\ V_r &= V_{mp} u_N, & V_{\theta, new} &= V_{mp} (V_p \cos(\theta_t) - w_p \cos(\theta_t)) \\ V_{z, new} &= V_{mp} (V_p \sin(\theta_t) + w_p \cos(\theta_t)) \end{aligned} \quad (۵)$$

برای ایجاد شرایط مرزی دارای گرادیان در OpenFoam می‌توان از کتابخانه GroovyBC استفاده کرد. نکته قابل توجه این است که این شرط مرزی برای حل گر dsmcFoam تعریف نشده است. از این رو برای رفع این مشکل باید از کدنویسی مناسب برای ایجاد این گرادیان روی دیواره استفاده کرد. به عنوان نمونه برای ایجاد گرادیان خطی دمایی بر روی دیواره روتور می‌توان کد زیر را در پوشه boundaryT برای صفحه دیواره روتور اعمال کرد:

```
rotorWall { Type fixedValue; Value uniform
List<scalar> Number Cell (Temperature Gradient)}
```

که در دستور فوق، Temperature Gradient دما متناسب با سلول‌های به کار رفته در راستای طول روتور می‌باشد. سپس با استفاده از دستور MixedDiffuseSpecular در فایل dsmcProperties و اعمال ضریب مناسب برای DiffuseFraction (ضریب تجمع تکانه)، می‌توان اثر شرط مرزی سرسیگناتی- لمپیس- لرد را برای اثر دمایی دیواره استفاده کرد.

۴.۳ اعمال اثر اسکوپ

هندسه اسکوپ می‌تواند تقارن یک ماشین سانتریفیوژ را برهم بزند به گونه‌ای که برای مدل کردن اثر واقعی آن نیاز به یک حل سه بعدی جریان درون روتور باشد. برای یک حل در مختصات متقارن محوری، می‌توان به جای اسکوپ از یک دیسک متقارن فرضی استفاده کرد تا تقارن حفظ گردد. نکته مهم در حضور یک اسکوپ، معادل کردن مقدار نیروی درگ ایجاد شده توسط اسکوپ با نیروی درگ ایجاد شده توسط دیسک فرضی است.

مؤلفه نیروی درگ (F_D) نیرویی است که در حالت سه بعدی بر اثر اختلاف فشار در راستای θ ایجاد می‌شود و برابر است با:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{4} \rho V_{\theta} A \quad (۶)$$

این نیرو به واسطه حضور اسکوپ در مقابل جریان ایجاد می‌شود. در حالت متقارن محوری به دلیل این که از تغییرات در راستای θ صرف نظر می‌شود، چنین نیرویی ایجاد نمی‌گردد. بنابراین برای ایجاد اثر این نیرو در جریان، از نیروی درگ اصطکاکی ایجاد شده به وسیله بخشی از سطح جانبی دیسک مدل شده به جای اسکوپ استفاده می‌شود. این ایجاد اختلاف سرعت زاویه‌ای بین لایه‌های سیال را می‌توان با ایجاد یک

مولکول‌های گاز به سمت دیواره روتور و با نزدیک شدن به ناحیه چگال و برخورد آن‌ها با مولکول‌های جلویی، مقدار سرعت شعاعی کاهش می‌یابد تا این‌که از یک شعاعی به بعد، پس از به تعادل رسیدن جریان، مقدار نزدیک به صفر را به خود می‌گیرند. گاز تزریق شده به داخل روتور به دلیل نیروی گریز از مرکز، در کنار دیواره چرخان روتور تجمع پیدا می‌کند و پس از به تعادل رسیدن جریان، گازهای کنار دیواره چرخان نیز سرعت چرخشی متناسب با سرعت چرخشی دیواره به خود می‌گیرند و با حرکت به سمت محور روتور، از مقدار آن کاسته می‌گردد. این اثر در شکل ۹ به خوبی قابل مشاهده است.

محفظه جداسازی روتور به دلیل فشار بالاتر آن از محفظه محصول، قدرت سرعت چرخشی بیش‌تری نیز به خود می‌گیرد به طوری که افت شعاعی سرعت چرخشی در محفظه محصول بیش‌تر از محفظه جداسازی روتور می‌باشد. شکل ۱۰ نمایی از افت شعاعی در سرعت چرخشی برای هر دو محفظه را نشان می‌دهد.

شکل ۴. تغییرات محوری فشار کنار دیواره روتور به دست آمده از حل گر DSMC و کد dsmcFOAM

شکل ۵. نمودار تغییرات شعاعی فشار محفظه جداسازی و محفظه محصول به دست آمده از کد DSMC حل گر dsmcFOAM

شبکه‌های به کار رفته در حل گر و کد 300×300 و تعداد زیر سلول‌های داخل هر سلول ۱۲ انتخاب گردیده است تا از برخورد ذرات همسایه در هر سلول اطمینان حاصل گردد. مقدار نسبت اختلاف سرعت چرخشی روتور و اسکوپ به سرعت زاویه‌ای روتور برابر 0.45° و مقدار گرادیان دمایی روی دیواره نیز 20°C در نظر گرفته شده است. در حل گر dsmcFOAM یک منبع تغذیه کوچک جهت تزریق بهتر خوراک به محیط شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است، هم‌چنین به دلیل این‌که حل گر dsmcFOAM در تمامی شبکه‌های ایجاد شده ذره قرار می‌دهد، لذا هندسه‌های بفل و اسکوپ به صورت فضای خالی در نظر گرفته می‌شوند.

علت استفاده از یک مخزن در ناحیه خوراک ورودی به روتور در حل گر dsmcFOAM، توزیع بهتر ذرات به داخل روتور براساس شرط مرزی تعریف شده برای تزریق خوراک می‌باشد. کانتور فشار به دست آمده از حل گر dsmcFOAM و کد DSMC به علت حضور یک نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش با سرعت بالای دیواره روتور به صورت نمایی از مرکز تا دیواره افزایش می‌یابد. این بدان معناست که به دلیل چرخش بالای دیواره روتور، اکثر گاز در لایه‌ای نزدیک به دیواره روتور تجمع پیدا می‌کند و جرم ناچیزی از گاز در ناحیه مرکزی روتور قرار می‌گیرد. در نقطه تزریق خوراک، فشار گاز خروجی از لوله خوراک‌دهی به دلیل انبساط ناگهانی (ورود به ناحیه خلأ) و حرکت گاز در تمامی جهات درون روتور کاهش می‌یابد. شکل ۴ کانتور فشار به دست آمده از حل گر dsmcFOAM و کد DSMC را نشان می‌دهد.

فشار در زیر بفل (محفظه محصول) بیش از یک مرتبه کم‌تر از فشار در محفظه جداسازی می‌باشد. به عبارتی می‌توان حضور بفل را به عنوان یک عامل جداساز بین محفظه جداسازی و محصول دانست. شکل ۵ تغییرات شعاعی فشار در مرکز روتور ($Z/Z_{\max}=0.5$) و محفظه محصول ($Z/Z_{\max}=0.1$) به دست آمده از حل گر dsmcFOAM و کد DSMC را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد، مقدار فشار در نقطه تزریق خوراک افزایش یافته و سپس به دلیل عامل انبساط ناگهانی کاهش می‌یابد. در شکل ۶ این اثر به خوبی نشان داده شده است.

هم‌چنین بردارهای جریان خوراک ورودی به دست آمده از کد DSMC در شکل ۷ نشان داده شده است. اعداد محوره‌های این شکل شماره سلول را مشخص می‌کنند. در شکل ۸ مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از سرعت شعاعی در نقطه تزریق خوراک توسط dsmcFOAM و کد DSMC ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سرعت شعاعی جریان گاز در نقطه ورود به روتور، به دلیل تبدیل انرژی درونی به انرژی جنبشی، افزایش می‌یابد و سپس با پیشروی به سمت جلو و افزایش نرخ برخورد آن‌ها با مولکول‌های گاز موجود در روتور، از مقدار سرعت شعاعی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، با حرکت

شکل ۱۰. کانتور افت شعاعی سرعت چرخشی در محفظه جداسازی و محفظه محصول.

حضور هر یک از محرک‌های گرمایی و مکانیکی به خودی خود موجب ایجاد یک جریان رفت و برگشتی درون روتور می‌گردند که تجمیع اثر این محرک‌ها نیز می‌تواند موجب تقویت این جریان رفت و برگشتی شود. بردارهای جریان تشکیل شده درون روتور در کنار محدوده اسکوپ و بفل به دست آمده از کد DSMC با حضور تمامی محرک‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جریان در اطراف بفل می‌تواند به گونه‌ای شکل گیرد که به دو مسیر تقسیم شود. بخشی از جریان با برخورد به بفل دوباره درون محفظه جداسازی قرار می‌گیرد و باقی‌مانده جریان وارد محفظه محصول شده و توسط اسکوپ محصول برداشت می‌گردد (شکل ۱۱ الف). هم‌چنین همان‌طور که در شکل ۱۱ ب مشاهده می‌شود، جریان در کنار دیواره به دلیل اعمال گرادیان دمای مثبت به آن، جهت رو به بالا به خود گرفته است و سپس با رسیدن به محدوده اسکوپ پسماند و برخورد با آن، این حرکت محوری به یک حرکت شعاعی رو به محور روتور تبدیل می‌گردد و سپس به دلیل اختلاف فشار و اعمال نیروی گریز از مرکز، جریان دوباره در راستای محوری در دو راستای بالا و پایین شروع به حرکت می‌کند. تبدیل این جریان محوری به یک جریان شعاعی توسط اسکوپ، به این دلیل که می‌تواند نحوه و مقدار شکل گرفتن جریان محوری درون روتور را تغییر دهد، بسیار حایز اهمیت می‌باشد.

شکل ۱۲ تغییرات سرعت شعاعی در محدوده اطراف اسکوپ (دیسک فرضی) را با استفاده از کد DSMC و حل گر dsmcFOAM نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، جریان محوری پس از برخورد با اسکوپ تبدیل به یک جریان شعاعی در جهت رو به محور روتور می‌گردد. وجود چنین جریان شعاعی منفی باعث چرخش جریان رفت و برگشتی درون روتور می‌گردد.

کانتور سرعت محوری درون روتور به دست آمده از حل گر dsmcFOAM و کد DSMC در شکل ۱۳ نشان داده شده است. به دلیل حضور محرک‌های گرمایی (اختلاف دمای روی کپ‌ها و گرادیان دمای روی دیواره روتور) و مکانیکی (اسکوپ و بفل) درون روتور، یک لایه جریان رو به بالا (هم‌جهت با اعمال گرادیان خطی دیواره) در کنار دیواره روتور و سپس یک لایه

شکل ۶. خطوط فشاری درون روتور از نقطه تزریق خوراک تا دیواره روتور برحسب پاسکال.

شکل ۷. بردار جریان در نقطه ورود خوراک.

شکل ۸. مقایسه سرعت شعاعی در نقطه تزریق خوراک برحسب شعاع ماشین با حل گر dsmcFOAM و DSMC.

(الف)

(ب)

شکل ۹. خطوط تغییرات سرعت چرخشی درون روتور (الف) کد DSMC (ب) حل گر dsmcFOAM.

شکل ۱۲. خطوط سرعت شعاعی اطراف اسکوپ پسماند به دست آمده از (الف) کد DSMC (ب) حلگر dsmcFOAM.

شکل ۱۳. کانتور سرعت محوری شکل گرفته درون روتور به دلیل اعمال محرک‌های گرمایی و مکانیکی (الف) کد DSMC (ب) حلگر dsmcFOAM.

شکل ۱۴. بردارهای جریان محوری اطراف اسکوپ پسماند و طریق برداشت جریان از آن (الف) کد DSMC (ب) حلگر dsmcFOAM.

شکل ۱۵. نحوه قرار گیری ذرات داخل روتور در حال چرخش.

جریان رو به پایین در لایه کناری آن تشکیل می‌گردد. در واقع جریان در یک لایه کاملاً چسبیده به دیواره روتور به سمت بالا حرکت می‌کند و سپس در قسمت بالایی روتور پس از برخورد با اسکوپ (دیسک فرضی) حرکت محوری آن تبدیل به حرکت شعاعی می‌گردد و در جهت محوری در تمام راستای روتور شروع به حرکت می‌کند. باید به این نکته توجه کرد که گازهای موجود در ناحیه مرکزی روتور نیز دارای مقادیر مشخصی سرعت محوری می‌باشند.

به دلیل برخورد جریان با سرعت چرخشی بالا به یک قطعه ساکن اسکوپ، گردابه‌هایی در اطراف اسکوپ تشکیل می‌گردد. جریان واقع شده در قسمت فوقانی و پایینی اسکوپ به سمت دریچه برداشت گاز اسکوپ شروع به حرکت می‌کنند و با رسیدن به ناحیه برداشت گاز، ذرات گاز از محیط شبیه‌سازی حذف می‌گردند. شکل ۱۴ بردارهای جریان محوری اطراف اسکوپ به دست آمده از حلگر dsmcFOAM و کد DSMC را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، جریان به صورت دو جریان هم‌راستا ولی مختلف‌الجهت از دریچه خروجی اسکوپ پسماند برداشت می‌گردند.

طرح‌واره‌ای از قرارگیری ذرات داخل یک روتور از ماشین سانتریفیوژ را به صورت شکل ۱۵ می‌توان نشان داد. ذرات گاز از داخل مخزن به داخل محیط روتور تزریق می‌گردند و سپس از ناحیه دریچه اسکوپ‌های پسماند و محصول با یک برش (نسبت دبی محصول به خوراک) برابر با ۰/۵ از محیط شبیه‌سازی برداشت می‌گردند.

شار جرمی محوری از حاصل ضرب سرعت محوری در چگالی جرمی قابل محاسبه بوده و یک پارامتر بسیار مهم در محاسبه مقدار ضرایب جداسازی در معادلات غلظت می‌باشد. شار جرمی محوری در اطراف اسکوپ به دلیل وجود گردابه‌های زیاد دارای چندین قله خواهد بود. با فاصله گرفتن از محدوده اسکوپ از تعداد این قله‌های اضافی کاسته شده و در میانه‌های روتور به یک عدد کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۶ شار جرمی محوری به دست آمده از حلگر dsmcFOAM و کد DSMC را در مرکز و ناحیه اطراف اسکوپ پسماند نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نتایج به دست آمده از حلگر و کد توسعه‌یافته دارای انطباق خوبی با یکدیگر هستند.

شکل ۱۱. بردارهای جریان در اطراف (الف) بفل (ب) اسکوپ.

می تواند تأییدی بر نحوه اعمال اثر هر یک از محرک های درون روتور بر روی کد DSMC و حل گر dsmcFOAM باشد.

مراجع

1. M. Benedict, H. Levi, T. Pigford, *Nuclear chemical engineering*, Nuclear Science and Engineering, **82(4)**, (1982).
2. G.A. Bird, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Oxford Univ. Press, New York (1994).
3. G.A. Bird, *Molecular Gas Dynamics*, Clarendon Press, Oxford, UK (1976).
4. G.A. Bird, *The DSMC Method*, Libraries Australia, (2013).
5. T. Kai, N.K. Hasegawa, *Numerical Calculation of Flow and Isotope Separation for SF₆ Gas Centrifuge*, Journal of Nuclear Science and Technology (2012).
6. J.P. Lahargue, Soubbaramayer, *A numerical model for the investigation of the flow and isotope concentration field in an ultracentrifuge*, Comp.Meths Appl. Mech.Eng., **15** 259-273 (1978).
7. P. Omnes, *Numerical and physical comparisons of two models of a gas centrifuge*, Journal of Computers & Fluids (2007).
8. S. Pradhan, V. Kumaran, *The generalized Onsager model for the secondary flow in a high-speed rotating cylinder*, J. Fluid Mech., **686**, 140-142 (2011).
9. D. Jiang, S. Zeng, *DSMC simulation of feed jet flow in gas centrifuge*, INIS (2011).
10. L. He, D.J. Jiang, C.T. Ying, *Simulation of overall flow in gas centrifuge considering feed jet*, INIS (2010).
11. L. He, D.J. Jiang, C.T. Ying, *DSMC simulation of feed influence on a gas centrifuge flow field*, INIS (2011).
12. P. Roblin, F. Doneddu, *Direct Monte Carlo simulation in a gas centrifuge*, InAIP Conference Proceedings, 169-173 (2001).
13. www.OpenFOAM.org.
14. Soubbaramayer, *Centrifugation*, Applied Physics, **35**, 183-244 (1979).
15. T.J. Scanlon, E. Roohi, C. White, *An open source, parallel DSMC code for rarefied gas flow in arbitrary geometries*, Mech. Rev. E, **72**, 3-7 (2010).
16. S. Yousefi Nasab, et al, *Investigation of concentration variation of the components of a three-component gas mixtures in the radial and axial direction of a gas centrifuge machine under "total reflux flow" conditions by using the DSMC method*, Journal of Nuclear Science and Technology, **89(3)**, 73-87 (2019).

استناد به این مقاله

صادق یوسفی نسب، جواد کریمی ثابت، سید جابر صفدری، الهام امینی، علی نوروزی (۱۴۰۰)، بررسی رفتار گاز درون روتور یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از کد DSMC توسعه یافته و حل گر dsmcFOAM، ۹۸، ۵۴-۶۳

DOI: 10.24200/nst.2021.1311

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1311.html

شکل ۱۶. شار جرمی محوری در مرکز روتور و اطراف اسکوپ پسماند به دست آمده از (الف) کد DSMC (ب) حل گر dsmcFOAM.

۵. بحث و نتیجه گیری

با توجه به اهمیت شبیه سازی ماشین سانتریفیوژ، در این مقاله ابزاری فراهم گردید که بتوان به این مهم دست یافت. نکته اساسی در شبیه سازی یک ماشین سانتریفیوژ استفاده از ابزاری مناسب برای مدل سازی رفتار گاز درون روتور می باشد. به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز، جریان گاز درون روتور به لایه بندی های مختلفی تبدیل می گردد که از یک رژیم مولکولی تا یک رژیم پیوسته را شامل می شود. حل عددی معادلات ناویراستوکس روشی مناسب جهت شبیه سازی ناحیه پیوسته واقع شده در لایه کناری دیواره روتور می باشد. از طرفی به دلیل تأثیر چشم گیر خوراک بر مقدار تغییرات شار جرمی محوری و چگالی درون روتور، نمی توان از شبیه سازی ناحیه مولکولی روتور یک ماشین سانتریفیوژ چشم پوشی کرد. روش DSMC یک راهکار مناسب جهت شبیه سازی رفتار گاز در ناحیه مولکولی ماشین سانتریفیوژ می باشد. البته از آن جا که این روش جوابی از معادله بواتزن محسوب می گردد، در صورت صرف هزینه محاسباتی، می توان از آن برای شبیه سازی رفتار گاز تمامی نواحی درون روتور استفاده کرد. استفاده از ابزار موازی سازی می تواند برای حل مشکل زمان محاسباتی این روش بسیار راهگشا باشد. به همین دلیل در این مقاله با استفاده از این روش به شبیه سازی متقارن محوری رفتار گاز درون روتور با استفاده از ابزار موازی سازی MPI پرداخته شده است. با توجه به این که داخل یک ماشین سانتریفیوژ از انواع مختلف محرک های گرمایی و مکانیکی جهت ایجاد جریان رفت و برگشتی استفاده می گردد، از این رو برای استفاده از روش DSMC، باید اثر تمامی این محرک ها در آن لحاظ گردد. در این مقاله با اعمال اثر هریک از محرک های درون روتور برای ایجاد جدایش شعاعی و محوری بر روی کد DSMC و حل گر dsmcFOAM (یک حل گر بر پایه DSMC از نرم افزار متن باز OpenFOAM) به شبیه سازی رفتار گاز درون روتور پرداخته شد و در انتها نتایج حاصل از شبیه سازی شامل کانتورهای جریانی و هم چنین تغییرات فشاری و شار جرمی محوری حاصل از هر دو با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج به دست آمده دارای انطباق بالایی (میانگین اختلاف کم تر از ۵٪) نسبت به یکدیگر می باشند که