

## بررسی عوامل مؤثر بر نیروهای وارده بر اسکوپ در یک ماشین سانتریفیوژ گازی در شرایط سه‌بعدی با روش DSMC

صبا باصیری<sup>۱\*</sup>، سید جابر صفدری<sup>۲</sup>، سید محمد قریشی<sup>۱</sup>، صادق یوسفی‌نساب<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، اصفهان - ایران

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

\*Email: s.basiri@ce.iut.ac.ir

### مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

### چکیده

در این مقاله به شبیه‌سازی سه بُعدی اسکوپ درون روتور یک ماشین سانتریفیوژ گازی پرداخته شده است. شکل هندسی اسکوپ درون ماشین سانتریفیوژ، سه بُعدی و اتحدار می‌باشد، در نتیجه جهت تحلیل رفتار صحیح جریان اطراف اسکوپ، شبیه‌سازی سه بُعدی ضرورت دارد. به همین منظور با استفاده از نتایج این شبیه‌سازی، جریان اطراف دو اسکوپ محصول و پسماند به صورت سه بُعدی مورد بررسی قرار گرفته است. به مقایسه بین نتایج شرایط عملیاتی فشار و دما، حاصل از شبیه‌سازی در ناحیه اسکوپ محصول و پسماند، مشاهده گردید که این مقادیر با فاصله اسکوپ از دیواره رابطه مستقیم دارند و مقادیر نیروی درگ در این دو ناحیه دارای اختلاف می‌باشند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، دلایل اختلاف مقادیر نیروی درگ در نواحی اسکوپ محصول و پسماند؛ اثرات فشار، دما و سرعت مولکول‌های گاز است، که برآیند این اثرات به صورت مستقیم بر ضرایب انطباق ممنتوم و بر میزان اختلاف سرعت چرخشی سیال اطراف اسکوپ (محصول یا پسماند) و اسکوپ به ازای ارتفاع  $(\frac{du_\theta}{dz})$ ، تأثیرگذار می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده، نیروی درگ اسکوپ محصول برابر با ۲۱۴۰ دین و مقدار نیروی درگ اسکوپ پسماند برابر با ۱۸۶۰ دین تعیین شدند.

**کلیدواژه‌ها:** ماشین سانتریفیوژ، محرک اسکوپ، OpenFOAM، حلگر dsmcFOAM، شبیه‌سازی سه بُعدی

## Investigation the effective factors on the forces acting on the scoop in a gas centrifuge machine in three-dimensional conditions with the DSMC method

S. Basiri<sup>\*1</sup>, J. Safdari<sup>2</sup>, S.M. Ghoreshi<sup>1</sup>, S. Yousefi-nasab<sup>2</sup>

1. Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, P.O.Box: , Tehran - Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

### Research Article

Received 25.11.2022, Accepted 12.3.2023

### Abstract

This article presents a simulation of a scoop inside the rotor of a gas centrifuge machine in three dimensions. The scoop inside the centrifuge machine is 3D and curved in shape. Therefore, a 3D simulation is necessary to analyze the proper flow behavior around the scoop. For this purpose, using the results of this simulation, the flow around the product and waste scoops has been investigated in three dimensions. As a result of simulation in the scoop area of the waste and product under operating conditions of pressure and temperature, it was observed that the values of these forces are directly related to the distance between the scoop and the wall, and the drag force values differ between these two areas. According to the investigations, the differences in drag force values between product and waste scoop areas can be explained by the effects of pressure, temperature, and velocity of gas molecules. There is a direct relationship between these effects and the coefficients of adaptation of momentum as well as the difference between the rotational velocity of the fluid around the scoop and the rotational velocity of the scoop per height ( $du_\theta/dz$ ).

**Keywords:** Centrifuge machine, Scoop drive, OpenFOAM, dsmcFOAM solver, 3D simulation



## ۱. مقدمه

که بر شکل‌گیری جریان محوری، میزان برداشت گاز و بازده جداسازی به صورت مستقیم تأثیرگذار می‌باشد.

جیانگ<sup>۴</sup> و همکارش در سال ۲۰۰۶، روش حجم محدود را برای حل معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس به کار بردند. آن‌ها شبیه‌سازی میدان جریان در سانتریفیوژ گازی را توسط روش CFD انجام دادند. در مدل سه‌بعدی ارائه شده معادلات جریان بدون محرک دمایی و ورود خوراک در نظر گرفته شدند و شوک‌های ایجاد شده در اثر برخورد گاز با اسکوپ مورد بررسی قرار گرفتند. در این مدل، اسکوپ‌ها به صورت یک میله استوانه‌ای متصل به یک لوله مرکزی بدون هیچ انحنا، مدل‌سازی شده‌اند و هیچ حفره جریانی<sup>۵</sup> توسط اسکوپ فرض نشده است. آن‌ها نشان دادند که پارامترهای بهینه شده در مدل‌های دوبعدی می‌توانند ۲۰ تا ۳۰ درصد از مدل‌های سه‌بعدی انحراف داشته باشند [۵]. بورمن<sup>۶</sup> و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۶، به شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک گاز در ماشین سانتریفیوژ گازی توسط روش CFD پرداختند. نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی در این مطالعه نشان داد که جریان نزدیک اسکوپ‌ها، امواج شوک شدید ایجاد می‌کند. در این شبیه‌سازی نیز همانند سایر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته سه‌بعدی با روش CFD ناحیه محور نادیده گرفته شده است [۶].

از آنجایی که از معادلات ناویر استوکس برای شبیه‌سازی نواحی مولکولی نمی‌توان استفاده نمود، اخیراً با پیشرفت سیستم‌های محاسباتی، روش دیگری به نام شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو<sup>۷</sup> برای گازهای رقیق پیشنهاد گردیده است. رابلین در سال ۲۰۰۱، به بررسی ناحیه رقیق در ماشین سانتریفیوژ پرداخت. او به دلیل عدم اعتبار معادلات ناویر استوکس در ناحیه ورودی خوراک و برقراری رژیم جریان رقیق در این ناحیه، از شبیه‌سازی به روش DSMC استفاده کرد [۷].

جیانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۱، جریان داخل یک ماشین سانتریفیوژ را با استفاده از روش DSMC مورد شبیه‌سازی قرار دادند. با انتخاب شرایط مرزی مناسب و مدل کردن برخورد های مولکولی، تحت شرایط مختلف، توزیع‌های شعاعی جریان دوبعدی خوراک به دست آمد [۸].

در سال ۲۰۱۹، خواجه‌نوری و همکارانش جریان خوراک و جریان اطراف اسکوپ‌ها در سانتریفیوژ را با استفاده از روش DSMC و در شرایط دوبعدی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به

در یک ماشین سانتریفیوژ در اثر نیروی گریز از مرکز شدید ناشی از دوران روتور، جز سنگین‌تر گاز، نزدیک به دیواره و جز سبک‌تر در فاصله‌ای دورتر از دیواره قرار می‌گیرد. به این ترتیب جدایش شعاعی بین ایزوتوپ‌ها رخ می‌دهد [۱]. ضریب جداسازی در جدایش شعاعی بسیار پایین است. در نتیجه به منظور افزایش این ضریب، بایستی حرکت محوری و جدایش محوری ایجاد گردد. از طریق عوامل محرکی مانند گرادیان دمای دیواره، اختلاف دمای کپ‌ها، حضور اسکوپ و ورود خوراک، جریان محوری درون روتور سانتریفیوژ شکل می‌گیرد. به طور کلی هدف از بررسی جریان گاز درون روتور سانتریفیوژ، رسیدن به جریان محوری مطلوب برای جداسازی ایزوتوپ‌های مورد نظر است [۲، ۳]. برای طراحی بهینه ماشین سانتریفیوژ گازی، به شبیه‌سازی با ابزارهای مختلف نیاز می‌باشد. یکی از روش‌های سنتی برای شبیه‌سازی ماشین سانتریفیوژ، روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> می‌باشد. همان‌طوری که بیان شد در ماشین سانتریفیوژ اکثریت گاز در نزدیک دیواره روتور تجمع یافته و گاز در این ناحیه یک گاز چگال می‌باشد، در نتیجه با برقراری شرط پیوستگی در این ناحیه، روش CFD یک روش مناسب برای شبیه‌سازی آن می‌باشد. از آنجایی که بیش‌تر قطعات درون روتور به جز اسکوپ، متقارن هستند، می‌توان با دیسک فرض کردن قطعه اسکوپ، از روش متقارن محوری با حفظ تقریبی دقت تا مقدار زیادی حجم محاسبات را کاهش داد.

بوگووالو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۵، به مدل‌سازی امواج در ماشین سانتریفیوژ گازی پرداخت. وی جریان ناپایای متقارن محوری ایجاد شده توسط برخورد با اسکوپ دیسکی در ماشین سانتریفیوژ مدل ایگاسو<sup>۳</sup> را به صورت عددی حل نمود. او نتایج حاصل از این پژوهش را با نتایج حالت پایا نیز مقایسه نمود. نتایج کار در این مدل نشان داد که در دما و فشار یکسان، فلاکس گاز در شکاف بفل، ۱۵٪ بیش‌تر از فلاکس در مدل پایا است [۴].

اسکوپ یکی از مهم‌ترین محرک‌های درون ماشین (محرک مکانیکی) می‌باشد که نقش بسیار مهمی را در شکل‌گیری جریان محوری و ایجاد شوک در ماشین سانتریفیوژ ایفا می‌کند. میزان فاصله اسکوپ تا دیواره از پارامترهای بسیار مهمی است

4. Jiang

5. Sink Flow

6. Borman

7. Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)

Journal of Nuclear Science and Technology

1. Computational Fluid Dynamic (CFD)

2. Bogovalov

3. Iguassu



اسکوپها، شوکهای ایجاد شده در دهانه ورودی اسکوپها و فشار شکل گرفته در آنها بررسی گردید.

## ۲. روش DSMC

روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو، روشی مبتنی بر انتخاب ذرات به صورت تصادفی است [۱۳]. این روش بیش‌تر برای شبیه‌سازی جریان گاز رقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد در نتیجه با توجه رقیق بودن گاز درون ماشین سانتریفیوژ در تمامی نقاط، روش DSMC روشی مناسب جهت شبیه‌سازی رفتار جریان گاز درون سانتریفیوژ می‌باشد. هدف از شبیه‌سازی DSMC، تعیین خواص میکروسکوپی جریان گاز، با میانگین‌گیری از خواص میکروسکوپی می‌باشد.

روش DSMC از شبیه‌سازی احتمالی مونت کارلو به منظور حل معادله بولتزمن<sup>۳</sup> برای جریان سیالات استفاده می‌کند. اجرای روش DSMC نیازمند تجزیه دامنه محاسباتی به مجموعه‌ای از سلول‌های شبکه<sup>۴</sup> می‌باشد [۱۴]. در شبیه‌سازی DSMC ابتدا ذرات به صورت یکنواخت در سیستم پراکنده می‌شوند. الگوریتم اصلی همه حلگرهای DSMC از جمله DSMCFOAM برای یک گام زمانی ( $t \rightarrow \Delta t$ ) به شرح زیر می‌باشد [۱۵]:

مرحله اول: در این مرحله شبکه‌بندی و مقداردهی اولیه ذرات نظیر تعداد ذره، سرعت اولیه و ... تعیین می‌گردد. ابتدا ناحیه محاسباتی ترسیم و شبکه‌بندی آن انجام می‌گیرد به طوری که جهت قرارگیری ذرات، بررسی حرکت آنها و همچنین برخورد ذرات در آن مشخص گردد. سپس مقداردهی اولیه در مختصات کارتزین به صورت مکان‌هایی در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشد که به صورت تصادفی در ناحیه محاسباتی قرار داده می‌شود. موقعیت همه ذرات در سیستم با استفاده از الگوریتم ردیابی ذرات OpenFoam به روز رسانی می‌شود. همچنین حرکت ذرات در سراسر سطوح شبکه و همچنین تعامل با مرزها کنترل می‌شود.

مرحله دوم: لیست ذرات در هر سلول محاسباتی جهت آماده‌سازی برای مرحله برخورد، به روز می‌شود.

مرحله سوم: تعداد برخوردهایی که باید در هر سلول محاسباتی انجام شود، محاسبه می‌گردد و برخوردها مطابق مدل برخورد دوتایی تعریف شده توسط کاربر، انجام می‌گیرد.

بررسی تأثیر خوراک و نیروی درگ اسکوپ بر یک دیگر پرداختند [۹].

در این روش با انتخاب ذرات نماینده، سیستمها با تعداد زیادی مولکول شبیه‌سازی می‌شود. در نتیجه یکی از روش‌های مناسب برای شبیه‌سازی گاز رقیق موجود در ناحیه مولکولی درون ماشین، روش DSMC می‌باشد. با احتساب این تفاسیر، با استفاده از این روش می‌توان میزان تأثیرپذیری ناحیه مولکولی بر ناحیه پیوسته را بررسی نمود.

روش‌های ترکیبی هم روش‌های مناسبی هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند ولی هم‌چنان تکنیک‌های ترکیب این دو روش در نقطه اتصال آنها در حال بررسی است [۱۰-۱۲]. یوسفی‌نسب و همکاران در سال ۲۰۲۱، اثر محرک اسکوپ و جنس سطح پلیمری روتور بر میزان توان جداسازی یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش شبیه‌سازی MD<sup>۱</sup>-DSMC در دو بعد را بررسی نمودند. با توجه به استفاده از مقیاس نانو در روش MD، از آن برای شبیه‌سازی محدوده نانومتری از دیواره روتور به همراه سیال مجاور آن استفاده شد. در این روش نتایج نشان داد که برای ضریب کاهش سرعت چرخشی ۰٫۸۴، مقدار کار جداسازی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و هم‌چنین جنس سطح روتور نیز یک عامل تأثیرگذار بر مقدار توان جداسازی یک ماشین سانتریفیوژ است [۱۰]. یکی از مهم‌ترین اختلاف‌های شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی در شبیه‌سازی اثر اسکوپ می‌باشد. اسکوپ در حالت واقعی یک لوله انحنادار می‌باشد، در حالی که در شبیه‌سازی متقارن محوری به صورت دیسکی در نظر گرفته می‌شود که نیروی درگ به آن اعمال می‌گردد و مدل کردن اثر اسکوپ در شبیه‌سازی دوبعدی کاملاً فرضی می‌باشد. در نتیجه در شبیه‌سازی‌های دوبعدی اسکوپ، پدیده‌هایی هم‌چون شوک غیر قابل مشاهده می‌باشد و هم‌چنین نیروی درگ وارد به اسکوپ، فشار و سرعت قبل و بعد از برخورد به اسکوپ و میزان تأثیرگذاری آن بر سایر پارامترهای جریان درون روتور واقعی نمی‌باشد. در نتیجه در این مقاله به شبیه‌سازی یکپارچه رفتار گاز هگزا فلوراید اورانیم<sup>۲</sup> درون روتور پرداخته شده است و به دنبال آن تأثیر قطعه اسکوپ درون روتور به صورت واقعی و سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین به دلیل این که در یک ماشین سانتریفیوژ، فاصله اسکوپ محصول تا دیواره از فاصله اسکوپ پسماند کم‌تر است، در این مطالعه نیز تأثیر فاصله اسکوپ تا دیواره بر جریان اطراف

3. Boltzmann's equation

4. Grid Cells

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (2), Serial Number 107, 2024, P 134-144

1. Molecular Dynamics (MD)

2. UF6



$R_f$  عددی تصادفی است که به صورت یکنواخت بین  $[0, 1]$  انتخاب می‌شود،  $\sigma_r$  سطح مقطع برخورد کل که تابعی از سرعت نسبی بین دو مولکول  $i$  و  $j$  می‌باشد و  $c_r$  سرعت نسبی بین دو مولکول  $i$  و  $j$  است [۱۶].

در روش DSMC، مدل لارسن-بورگنک<sup>۵</sup> رایج‌ترین روش برای تبادل انرژی چرخشی می‌باشد [۱۷، ۱۸]. مدل‌های برخوردی کره سخت متغیر<sup>۶</sup> و کره نرم متغیر<sup>۷</sup> در اجرا از لحاظ کارایی عددی تفاوت بسیار کمی با هم دارند. مدل VSS علاوه بر ضرایب ویسکوزیته، به ضرایب نفوذ نیز نیاز دارد. به همین دلیل است که با وجود پیاده‌سازی مدل VHS تقریباً در همه کدهای DSMC، استفاده از آن بیش‌تر محدود به گونه‌هایی است که اطلاعات مربوط به ضرایب نفوذ آن‌ها در دسترس نباشد.

یکی از مراحل بسیار مهم در روش DSMC تعیین شرط مرزی مناسب برای انعکاس مولکول‌های برخورد کرده با سطح می‌باشد. موقعیت و سرعت ذره پس از برخورد بر اساس شرط مرزی انتشاری، طیفی یا سرسیگناتی-لمپیس لرد تعیین می‌گردد. در مدل انتشاری، مولکول‌های گاز برای یک مدت زمان طولانی، نزدیک دیواره جذب می‌شوند به همین دلیل به طور میانگین، هر مولکولی که با دیواره برخورد می‌کند تمامی مومنت خود را به دیواره منتقل می‌کند. بعد از آن مولکول‌های جذب شده با احتمال برابر برای انعکاس، در تمامی زوایا از دیواره منعکس می‌گردند. شرط مرزی دیگری که مورد استفاده قرار می‌گیرد شرط مرزی طیفی می‌باشد. در مدل برخورد طیفی، مولکول یک برخورد کاملاً الاستیک را تجربه می‌کند که هیچ‌گونه جذبی بر روی دیواره صورت نمی‌گیرد. در نتیجه هیچ تبادل مومنتی بین مولکول برخورد کرده و دیواره اتفاق نمی‌افتد. در واقع در شرایطی که زمان جذب مولکول‌ها بر روی دیواره خیلی بلند یا کوتاه نباشد، استفاده از مدل‌های نفوذی یا طیفی مناسب نمی‌باشد.

در روش DSMC، بهترین مدل برای استفاده در شرط مرزی برخورد با دیواره، مدل سرسیگناتی-لمپیس-لرد<sup>۸</sup> (CLL) است. این مدل، ترکیبی از دو مدل انتشاری و طیفی می‌باشد. در مدل CLL، با به دست آوردن ضرایب انطباق مومنت و انرژی به طور جداگانه، دقیق‌ترین اجزاء سرعت بعد از برخورد را می‌توان استخراج کرد. در مرحله بعد از ذرات نمونه‌برداری می‌شود.

مرحله چهارم: برخورد ذرات با دیواره بر اساس موقعیت ذره و مرز بررسی می‌شود. به عبارتی در اثر برخورد ذره با دیواره، موقعیت و سرعت آن متناسب با نوع شرط مرزی انتخابی (انتشاری<sup>۱</sup>، طیفی<sup>۲</sup> و سرسیگناتی-لمپیس-لرد<sup>۳</sup>) مشخص می‌گردد.

مرحله پنجم: از موقعیت‌های ذرات، سرعت‌ها، انرژی‌های داخلی و غیره که برای محاسبه مقادیر ماکروسکوپی مورد نیاز است، نمونه‌برداری می‌شود.

مرحله ششم: به مرحله اول جایی که  $t=t+\Delta t$  بر می‌گردد و مراحل تکرار می‌شود تا این‌که زمان پایان شبیه‌سازی ( $t_{end}$ ) فرا برسد.

در روش DSMC، در ابتدا می‌بایستی به تنظیم شرایط اولیه پرداخت که کاربر در حلگر dsmcFOAM، این فرایند را با استفاده از ابزارهای پیش‌پردازش شامل: تعیین سرعت اولیه ذرات، دما و چگالی انجام می‌دهد. سپس حرکت و ردیابی ذرات طبق الگوریتم ردیابی ذرات در dsmcFOAM انجام می‌گیرد. این الگوریتم دو هدف مهم در بر دارد؛ اولاً چه زمانی ذرات در سلول‌های شبکه جابه‌جا می‌شوند، دوماً چه زمانی ذرات درون سلول‌های شبکه با هم و با مرزها برخورد می‌کنند.

در این مرحله از شبیه‌سازی، نحوه محاسبه برخوردهای دوتایی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. قبل از شروع مرحله برخورد و بعد از جابه‌جایی و ردیابی همه ذرات تا موقعیت‌های جدید، بایستی آن‌ها مجدداً فهرست‌بندی شوند. روش‌های مختلفی برای حصول اطمینان از انجام تعداد صحیح برخوردها وجود دارد، اما روش اصلی مورد استفاده در dsmcFOAM طرح شمارشگر بدون زمان<sup>۴</sup> است. جفت‌ها از یک سلول در یک گام زمانی معین انتخاب می‌شوند. به گونه‌ای که برای کاهش تعداد اضافی برخوردهای انتخابی و هم‌چنین برای نزدیک شدن نتایج به حالت واقع‌بینانه از تکنیک زیر سلول استفاده می‌شود. در این تکنیک انتخاب جفت ذرات برخوردی به جای سلول از زیر سلول انتخاب می‌شوند. سپس هر جفت برخورد با استفاده از روش پذیرش-رد آزمایش می‌شود، یعنی برخورد پذیرفته می‌شود اگر:

$$\frac{(\sigma_r c_r)_{ij}}{(\sigma_r c_r)_{\max}} > R_f \quad (1)$$

5. Larsen-Borgnakke

6. Variable Hard Sphere (VHS)

7. Variable Soft Sphere (VSS)

8. Cercignani-Lampis-Lord (CLL)

Journal of Nuclear Science and Technology

1. Diffused

2. Specular

3. Cercignani-Lampis-Lord (CLL)

4. No-Time-Counter (NTC)



۳.۳ اعمال پارامترهای فیزیکی (ویرایش فایل‌های زیرشاخه پوشه constant)

#### ۱.۳ ایجاد شبکه (ترسیم هندسه و شبکه‌بندی مدل)

برای ترسیم هندسه و شبکه‌بندی حجم کنترل دو راه وجود دارد: راه اول ایجاد هندسه و شبکه‌بندی در OpenFOAM است. راه دوم ایجاد هندسه و شبکه‌بندی توسط نرم‌افزارهای دیگر و سپس وارد کردن آن به نرم‌افزار OpenFOAM می‌باشد. در این مطالعه روش دوم برای ایجاد شبکه انتخاب گردید، به این ترتیب که هندسه و شبکه‌بندی سه‌بعدی کل روتور در نرم‌افزار Gambit ترسیم شد.

البته برای ایجاد شبکه و وارد کردن آن به نرم‌افزار OpenFOAM راهکارهای متفاوتی در این مطالعه اعمال و بررسی گردید و بر اساس همگرا شدن روش، مناسب‌ترین و بهترین راهکار از بین آن‌ها اعمال شد. جهت کاهش میزان خطا، شبکه‌های کنار دیواره کوچک‌تر از میانگین پوشش آزاد در نظر گرفته شد. با توجه به فشار کنار دیواره روتور، میانگین پوشش آزاد از مرتبه میلی‌متر خواهد بود، در نتیجه اندازه شبکه در کنار دیواره روتور نیز از مرتبه میلی‌متر در نظر گرفته شد.

$$\lambda = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 P} = 1.236 \times 10^{-7} \text{ (m)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $K_B$  ثابت بولتزمن،  $T$  دما،  $d$  قطر مولکول اورانیم هگزافلوراید و  $P$  فشار دیواره روتور است [۲].

کیفیت شبکه تأثیر مهمی بر روی دقت حل، زمان محاسبات و نرخ همگرایی (یا عدم همگرایی) دارد. به همین منظور شبکه توسط دستور "check Mesh" مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از ترسیم و شبکه‌بندی هندسه، شبکه به نرم‌افزار OpenFoam وارد و شرایط اولیه اعمال گردید. در شکل ۱ هندسه شبکه‌بندی شده روتور نشان داده شده است.

#### ۲.۲ اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مطلوب (ویرایش فایل‌های زیرشاخه پوشه 0)

یکی از مباحث بسیار مهم در شبیه‌سازی‌ها انتخاب شرایط مرزی مناسب و منطبق با فیزیک مسأله است. پیش از حل بایستی شرایط مرزی مناسب و اولیه به هندسه اعمال شود.

### ۳. شبیه‌سازی سه‌بعدی ماشین سانتریفیوژ گازی

جهت تعیین اثر اسکوپ بر پدیده‌هایی هم‌چون شوک، فشار و سرعت گاز قبل و بعد از برخورد با اسکوپ، میزان تأثیرگذاری اسکوپ بر سایر پارامترهای جریان درون روتور و میزان تأثیرپذیری ناحیه مولکولی بر ناحیه چگال، شبیه‌سازی سه‌بعدی کل فضای روتور با حضور همه محرک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

به همین منظور در این مقاله برای اولین بار اثر اسکوپ به صورت سه‌بعدی با اعمال انحنای واقعی آن، مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفت. هندسه درون روتور بررسی شده در این مطالعه شامل اجزای مختلفی نظیر: بیلوز، دیواره روتور (سطح جانبی، کپ بالا و کپ پایین)، بفل، قطعات سیستم گاز رسانی (نقطه تزریق خوراک، اسکوپ محصول و اسکوپ پسماند) است. بر اساس معیار کوچک‌تر بودن میزان بازه زمانی از میانگین زمان برخورد ( $\tau$ ) و اختلاف کم‌تر از  $10^{-5}$  بین پارامترهای دما، فشار و سرعت در دو تکرار، مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) برابر  $2 \times 10^{-7}$  ثانیه و مدت زمان واقعی شبیه‌سازی برابر با ۱۰ ثانیه، در اجراهای موازی با ۴۴۰ پردازشگر انتخاب شدند. پس از بررسی نتایج استقلال از شبکه، تعداد کل شبکه روتور و قطعات مختلف درون آن  $7375675$  و تعداد ذرات شبیه‌سازی شده  $3 \times 10^6$  در نظر گرفته شد. در تمام شبیه‌سازی‌ها گاز درون روتور هگزافلوراید اورانیم در نظر گرفته شد.

انتخاب حلگر بخش مهمی از مسیر فرایند شبیه‌سازی جریان است. زیرا انتخاب حلگر نحوه آماده‌سازی مسأله را تعیین می‌کند، بنابراین لازم است که این انتخاب آگاهانه باشد. dsmcFOAM به عنوان پکیجی از روش DSMC و به عنوان حلگری برای شبیه‌سازی گاز درون روتور معرفی گردید. به این دلیل که هدف، شبیه‌سازی کل فضای درون روتور بدون حذف هیچ ناحیه‌ای از آن می‌باشد، با پذیرش حجم محاسباتی بالاتر نسبت به روش CFD، حلگر dsmcFOAM انتخاب گردید. علاوه بر این به دلیل عدم همگرایی روش CFD در ناحیه مولکولی محور و نیز پیشرفت سیستم‌های محاسباتی در حل ناحیه چگال توسط روش DSMC، انتخاب این حلگر یکی از بهترین گزینه‌های موجود می‌باشد. پس از انتخاب حلگر، یک نمونه از مثال‌های موجود در tutorial انتخاب و تغییرات بر روی آن اعمال شد. تغییرات عمده عبارتند از:

#### ۱.۳ ایجاد شبکه (ترسیم هندسه و شبکه‌بندی مدل)

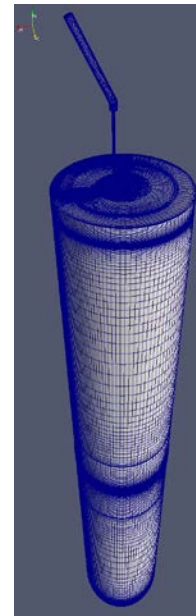
۲.۲ اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مطلوب (ویرایش فایل‌های زیرشاخه پوشه 0)



جریانی که ذکر گردید، ایجاد می‌کند. همچنین از شرط مرزی "flowRateOutletVelocity"، به عنوان شرایط مرزی خروجی سرعت یعنی خروجی اسکوپ‌های محصول و پسماند، استفاده شد که این شرط مرزی نیز، سرعت برون‌یابی شده را جهت انطباق با میزان دبی جریان تصحیح می‌کند. میزان برش برابر است با میزان دبی جرمی محصول به ازای دبی جرمی خوراک ( $cut = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f}$ )، که بر اساس فاصله سر اسکوپ تا دیواره و همچنین فشار شکل گرفته در محفظه محصول و محفظه جداسازی، مقدار ۰/۴۵ به دست آمد. به همین منظور، شرط مرزی ورودی سر اسکوپ‌ها در نرم‌افزار Gambit به صورت داخلی<sup>۱</sup> تعریف شد و هیچ نوع شرط مرزی سرعتی در حلگر برای آن اعمال نگردید. شرط مرزی سرعت برای سطوح ثابت، "fixedValue" و برای سطوح چرخشی، "rotatingWallVelocity" تعیین و اعمال گردید. در شرایط مرزی مذکور، بعد دبی جریان کیلوگرم بر ثانیه است. برای سایر مرزهای مجهول، شرط مرزی "zeroGradient" تنظیم گردید.

### ۳.۳ اعمال پارامترهای فیزیکی (ویرایش فایل‌های زیرشاخه پوشه constant)

در شبیه‌سازی توسط روش DSMC، انتخاب تعداد ذرات شبیه‌سازی شده از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به این دلیل که اگر تعداد این ذرات بسیار زیاد در نظر گرفته شود، ممکن است نتایج حاصل به واقعیت نزدیک‌تر شود اما افزایش حجم و هزینه محاسباتی را به دنبال دارد. از طرف دیگر اگر این ذرات بسیار کم لحاظ گردد، باعث عدم انطباق یا نزدیکی نتایج به واقعیت و بروز خطا در شبیه‌سازی می‌شود و همچنین سایر خواص جریان نظیر فشار سیستم را نیز تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. از دیگر پارامترهای فیزیکی می‌توان به مدل برخورد مولکول‌ها با یکدیگر و با دیواره اشاره کرد که با توجه به نوع سیستم، جهت افزایش دقت محاسبات بایستی نزدیک‌ترین مدل‌ها به سیستم انتخاب گردند. جرم، قطر و ... ذرات نیز در نتایج جداسازی در ماشین سانتریفیوژ گازی و میزان تحت تأثیر قرار گرفتن در میدان چرخشی و محوری به صورت مستقیم مؤثر هستند. در این پژوهش به دلیل در نظر گرفتن گاز مورد شبیه‌سازی به صورت تک جزیی از مدل VHS استفاده شده است.



شکل ۱. هندسه شبکه‌بندی شده روتور ماشین سانتریفیوژ.

### • تنظیمات پوشه 0 حلگر: فایل boundary T

به منظور اعمال گرادیان دمایی خطی روی دیواره روتور از ابزار groovyBC استفاده می‌شود. با استفاده از این ابزار می‌توان شرایط مرزی متنوعی ایجاد کرد. همچنین این ابزار با داشتن قابلیت‌های متفاوت جز ابزارهایی است که کار با نرم‌افزار OpenFoam را آسان‌تر و بهتر می‌کند. این شرط مرزی از زیرکلاس شرط مرزی mixed-BC است که در آن مقدار مرز را می‌توان به صورت تابعی از مقادیر مکان، زمان و گرادیان‌ها تعیین کرد. ابزار groovyBC در کتابخانه حلگر dsmcFoam تعریف نشده است، در نتیجه با بررسی تمام جوانب حل برای حصول نتایج دقیق گرادیان دمایی بر روی دیواره روتور در این مرحله، از اجرای CFD استفاده گردید. سپس گرادیان خطی دمایی ایجاد شده در دیواره روتور در اجرای DSMC، استفاده شد. به طوری که دمای روی دیواره روتور از مقدار مرجع ۳۰۰ کلوین شروع می‌شود و در راستای طول روتور (Z) به اندازه ۳۵ کلوین افزایش می‌یابد. شرط مرزی دما در محل ورود خوراک ثابت در نظر گرفته شد.

### • فایل boundary U

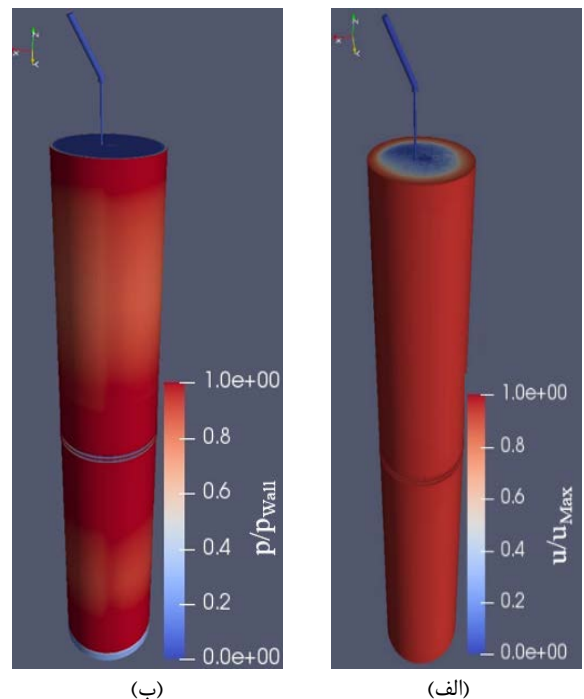
به دلیل اهمیت بالای تطبیق دو پارامتر سرعت و دبی جریان، شرط مرزی "flowRateInletVelocity" به عنوان شرط مرزی ورودی سرعت یا به عبارتی ورودی خوراک به داخل روتور استفاده شد. این شرط مرزی، سرعت برون‌یابی شده را جهت انطباق با میزان دبی جریان تصحیح می‌کند یا این‌که یک میدان سرعت یکنواخت نرمال در پاره مد نظر منطبق بر همان دبی



## ۴. نتایج

شکل ۲ تغییرات سرعت چرخشی و فشار را درون روتور ماشین سانتریفیوژ نشان می‌دهد. به دلیل وجود جریان رقیق درون روتور، ذرات در ابتدا حرکات نامنظمی دارند. سپس در اثر چرخش دیواره، ذرات با یکدیگر و با دیواره برخورد می‌کنند و مادامی که در حال برخورد هستند نیروی گریز از مرکز نیز بر آن‌ها اعمال می‌گردد. با گذر زمان ذرات به نسبت جرم مولکولی که دارند، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار گرفته و در دیواره متراکم می‌گردند. به همین دلیل ذرات در کنار دیواره با سرعت نزدیک به دیواره حرکت می‌کنند و این سرعت را با مکانیزم برخورد به یکدیگر القا می‌کنند. همان‌طوری که شکل ۲-الف نشان می‌دهد پس از به تعادل رسیدن جریان، مولکول‌های گاز کنار دیواره چرخان نیز، سرعت چرخشی متناسب با سرعت چرخشی دیواره به خود می‌گیرند. با فاصله گرفتن از دیواره روتور به سمت محور و کاهش تراکم ذرات از شدت انتقال سرعت چرخشی کاسته می‌شود.

در شکل ۲-ب نیز مشاهده می‌شود ذرات تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز، در نزدیکی دیواره تجمع می‌یابند. در اثر چرخش سریع دیواره روتور، ذرات در جهت چرخش شتاب می‌گیرند. پس از به تعادل رسیدن جریان، ذرات در کناره دیواره متراکم می‌شوند و فشار در دیواره روتور افزایش می‌یابد. هم‌چنین با حرکت از دیواره به سمت محور روتور، تراکم ذرات کم‌تر شده و فشار به طور نمایی کاهش می‌یابد.



شکل ۲. کانتورهای شکل گرفته درون روتور ماشین سانتریفیوژ (الف) تغییرات سرعت چرخشی، (ب) تغییرات فشار.

در شکل ۳ نمودارهای تغییرات شعاعی فشار و سرعت در ناحیه اطراف اسکوپ پسماند ( $Z/Z_H=0.98$ ) و اطراف اسکوپ محصول ( $Z/Z_H=0.11$ ) نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل ۳-الف مشاهده می‌گردد به دلیل فاصله کم‌تر اسکوپ محصول تا دیواره نسبت به اسکوپ پسماند (تقریباً یک سوم)، فشار در دهانه اسکوپ محصول (نقطه ۲) از فشار در دهانه اسکوپ پسماند (نقطه ۱) بیش‌تر تعیین شده است. مولکول‌ها با سرعت چرخشی بالا به ضخامت سر اسکوپ برخورد می‌کنند، در اثر این برخورد از سرعت چرخشی آن‌ها کاسته شده و مقدار آن به صفر نزدیک می‌شود. با برخورد سایر مولکول‌ها با مولکول‌های ساکن، توده‌ای از مولکول‌های تجمع یافته در قسمت سر اسکوپ شکل می‌گیرد که این موجب افزایش موضعی فشار، در دهانه ورودی سر اسکوپ می‌شود. با توجه به فاصله کم‌تر اسکوپ محصول تا دیواره روتور نسبت به اسکوپ پسماند و با توجه به افزایش تراکم مولکول‌ها با نزدیک‌تر شدن به دیواره روتور، ورودی اسکوپ محصول در معرض برخورد با مولکول‌های بیش‌تری قرار دارد و توده مولکولی فشرده‌تری در این قسمت ایجاد می‌گردد. در نتیجه سر اسکوپ محصول نسبت به سر اسکوپ پسماند دارای فشار بیش‌تری می‌باشد. از طرفی سرعت چرخشی مولکول‌ها در کنار دیواره روتور به سرعت چرخشی دیواره نزدیک می‌باشد. با فاصله گرفتن از دیواره شدن به محور روتور از سرعت مولکول‌ها کاسته می‌شود. مطابق با شکل ۳-ب مشاهده می‌شود که سرعت چرخشی در دهانه اسکوپ محصول (نقطه ۴) حدود ۷ درصد از سرعت در دهانه اسکوپ پسماند (نقطه ۳) بیش‌تر است.

مؤلفه نیروی درگ ( $F_D$ )، نیرویی است که در حالت سه‌بعدی بر اثر اختلاف فشار در راستای  $\theta$  ایجاد می‌شود و برابر است با:

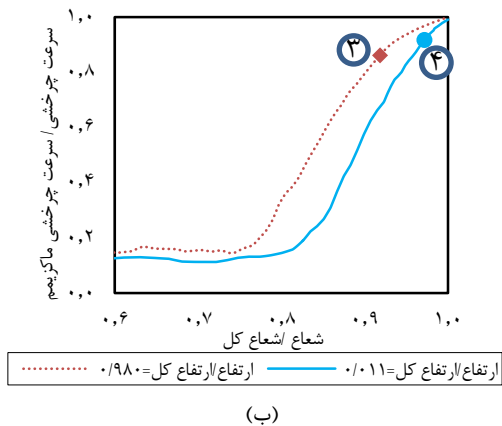
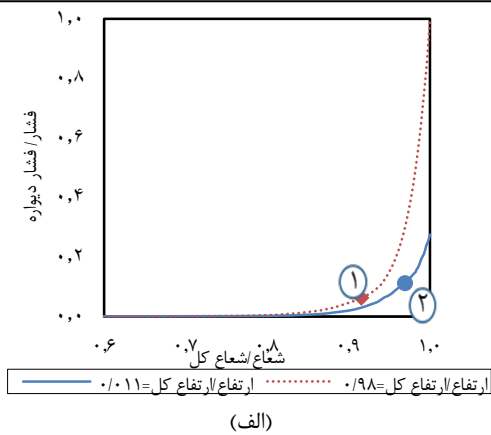
$$F_D = \tau A \quad (3)$$

این نیرو به واسطه حضور اسکوپ در مقابل جریان ایجاد می‌شود [۱۹]. در رابطه ۳،  $\tau$  تنش برشی  $A$  مساحت می‌باشد. تنش برشی نیز برابر است با:

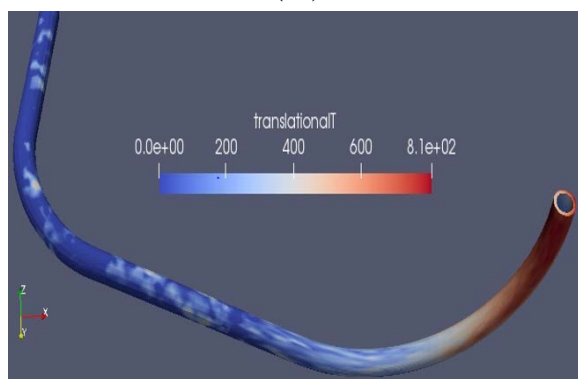
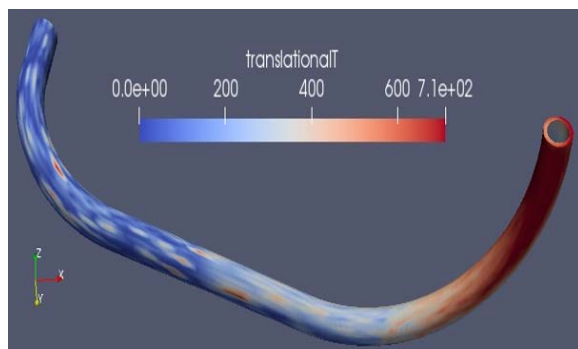
$$\tau = \left( \frac{\gamma - \sigma_T}{\sigma_T} \right) \mu \frac{du_\theta}{dz} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $\frac{du_\theta}{dz}$  تغییرات سرعت چرخشی در راستای ارتفاع و  $\sigma_T$  برابر با ضریب انطباق مومنوم مماسی می‌باشد.





شکل ۳. نمودار الف) تغییرات فشار در نواحی اسکوپ محصول و پسماند، ب) تغییرات سرعت در نواحی اسکوپ محصول و پسماند.



شکل ۴. تغییرات دما در ورودی و بدنه اسکوپ، الف) اسکوپ پسماند، ب) اسکوپ محصول.

بر اساس موارد مذکور، نقاط ۱ تا ۴ در شکل ۳ نشان می‌دهد که نیروی درگ ایجاد شده توسط اسکوپ‌ها متأثر از دو عامل زیر می‌باشد.

۱. عامل فشار (یا همان دانسیته عددی)

۲. عامل سرعت (سرعت چرخشی ذرات برخورد کرده با اسکوپ) مقدار ضریب انطباق مومنوم مماسی ( $\sigma_T$ ) با کاهش فشار و با افزایش دما و سرعت چرخشی، کاهش می‌یابد [۱۰]. با توجه به این که مقدار سرعت چرخشی، فشار و دما در دهانه ورودی اسکوپ محصول بیش‌تر از اسکوپ پسماند می‌باشد، برآیند این اثرات تأثیر کاهشی بر مقدار ضریب انطباق مومنوم مماسی برای اسکوپ محصول گذاشته است. بر این اساس مقادیر میانگین ضرایب انطباق مومنوم مماسی برای اسکوپ محصول و پسماند به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۹۲ تعیین گردید.

مطابق با شکل ۳-ب با توجه به فاصله کم‌تر اسکوپ محصول تا دیواره نسبت به اسکوپ پسماند، میزان اختلاف سرعت چرخشی سیال اطراف اسکوپ محصول و اسکوپ به ازای ارتفاع  $(\frac{du_\theta}{dz})$  بیش‌تر از این اختلاف برای اسکوپ پسماند می‌باشند.

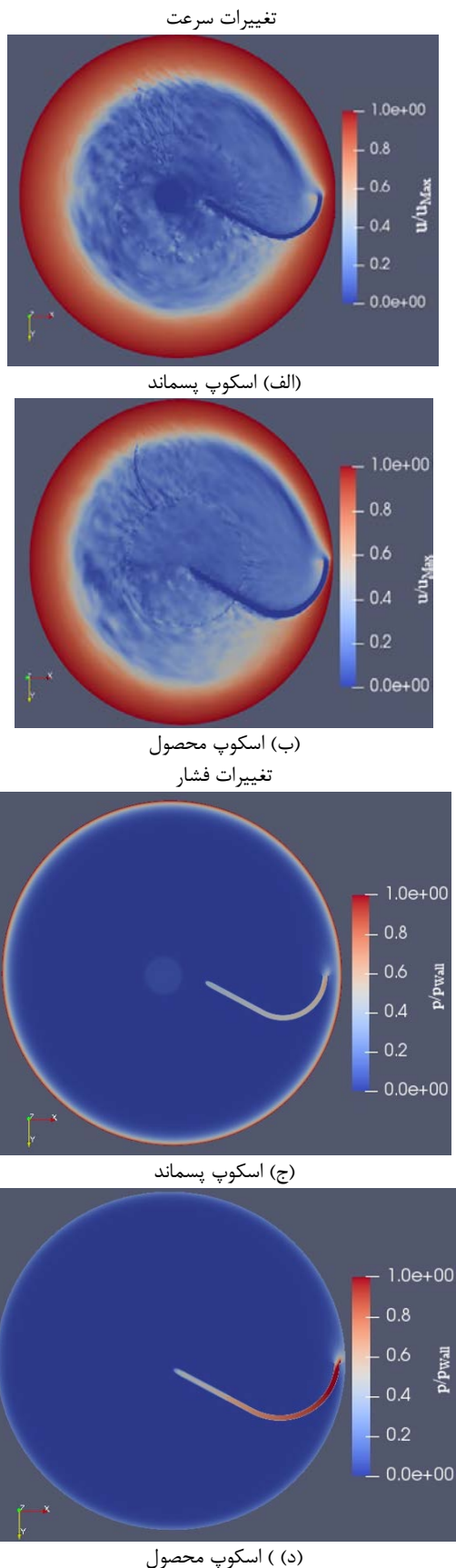
با توجه به این که ضریب انطباق مومنوم مماسی در اسکوپ محصول کم‌تر از اسکوپ پسماند تعیین شده است، همچنین با توجه به بیش‌تر بودن مقدار  $(\frac{du_\theta}{dz})$  برای اسکوپ محصول،

مقدار نیروی درگ برشی برای اسکوپ محصول برابر با ۲۱۴۰ دین و نیروی درگ اسکوپ پسماند برابر با ۱۸۶۰ دین تعیین شد. بر اساس مقدار اختلاف بین سرعت دیواره روتور و سیال اطراف آن، می‌توان مقدار لغزش سرعت برای دیواره محفظه محصول را تعیین کرد. بر این اساس مقدار لغزش سرعت برابر با ۱۰ متر بر ثانیه تعیین شده است.

با توجه به این که تعداد مولکول‌های برخوردی به سر اسکوپ محصول با سرعت چرخشی بالا، نسبت به مولکول‌های برخوردی به اسکوپ پسماند بیش‌تر است، افزایش دمای موضعی در سر اسکوپ محصول (شکل ۴-الف) نیز از اسکوپ پسماند (شکل ۴-ب) بیش‌تر شده است. این اثر در شکل ۴ نشان داده شده است.







شکل ۵. کانتور الف) تغییرات سرعت اسکوپ پسماند، ب) تغییرات سرعت اسکوپ محصول، ج) تغییرات فشار اسکوپ پسماند، د) تغییرات فشار اسکوپ محصول.

در شکل ۵ تغییرات سرعت و فشار در اطراف اسکوپ پسماند ( $z/Z_H=0.98$ ) و اسکوپ محصول ( $z/Z_H=0.11$ ) نشان داده شده است. همان طوری که در شکل ۵-الف و ۵-ب مشاهده می شود با فاصله از محور به سمت دیواره روتور، مقدار سرعت چرخشی افزایش می یابد و در نزدیکی دیواره سرعت چرخشی با سرعت چرخشی دیواره برابر می باشد. همچنین با توجه به فاصله کم تر اسکوپ محصول تا دیواره روتور نسبت به اسکوپ پسماند، مولکول ها با سرعت بیشتری به سر اسکوپ محصول برخورد می کنند و اغتشاشات جریانی بیشتری نیز ایجاد می کنند در نتیجه تأثیرات بیشتری بر روی گرادینان سرعت بر روی دیواره ایجاد می شود.

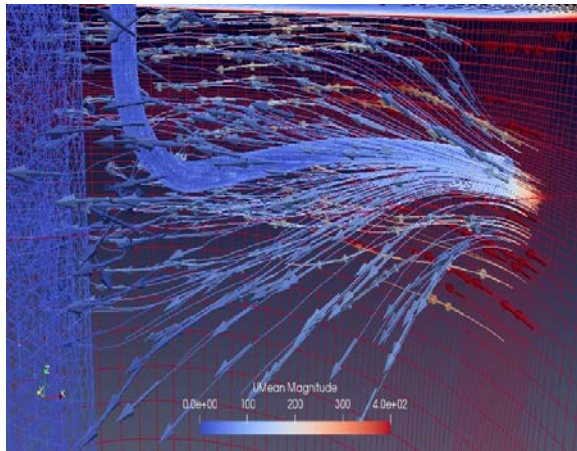
در شکل ۵-ج و ۵-د گرادینان شعاعی فشار در اطراف دو اسکوپ پسماند و محصول نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می شود فشار دیواره روتور در ناحیه حضور اسکوپ پسماند (محفظه جداسازی، شکل ۵-ج) از فشار دیواره روتور در ناحیه حضور اسکوپ محصول (محفظه محصول، شکل ۵-د) بیش تر است. علت اصلی اختلاف فشار در این دو ناحیه قطع جریان محوری توسط بفل می باشد. به عبارت دیگر بفل مانع از ورود کامل جریان محوری به محفظه محصول می شود و به این ترتیب تعداد کمتری از مولکول ها به این محفظه راه می یابند. در نتیجه تعداد مولکول هایی که در اثر نیروی گریز از مرکز در محفظه محصول در دیواره روتور تجمع می یابند، کم تر بوده و میزان فشار نیز در دیواره روتور در این ناحیه کم تر می باشد. همچنین مقایسه دو شکل ۵-ج و ۵-د، بالاتر بودن میزان فشار در ورودی سر اسکوپ محصول نسبت به سر اسکوپ پسماند که در شکل ۳-الف تحلیل گردید را تصدیق می کند.

علاوه بر این با مقایسه دو شکل ۵-ج و ۵-د مشاهده می گردد که فشار درون لوله اسکوپ محصول از فشار درون لوله اسکوپ پسماند بیشتر می باشد. به دلیل این که مولکول های گاز با سرعت چرخشی بالا، هم زمان تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز در دیواره روتور متراکم شده اند و با توجه به این که اسکوپ محصول فاصله کمتری تا دیواره روتور نسبت به اسکوپ پسماند از دیواره دارد، مولکول های گاز با سرعت و فشار بیشتری به درون لوله اسکوپ محصول وارد می شوند. در نتیجه با ورود این مولکول ها به درون لوله اسکوپ محصول فشار در این ناحیه بیش تر است.

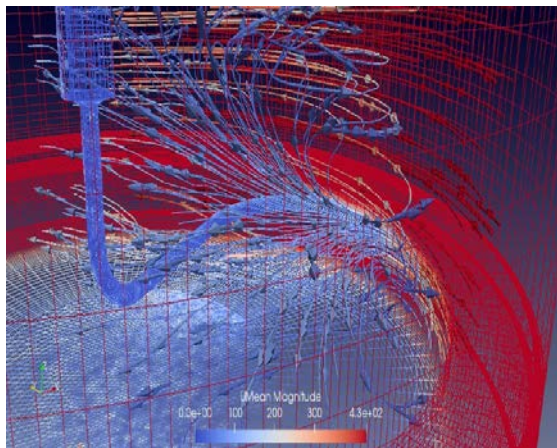
طبق شکل های ۵-ج و ۵-د، گاز هنگام ورود به لوله اسکوپ تا قبل از رسیدن به انحنای اسکوپ، فشار ورودی کمتری نسبت به فشار در ناحیه انحنادار دارد. تغییر جهت مولکول ها در قسمت انحنادار و به دنبال آن افزایش تعداد برخوردهای مولکولی به سطح، باعث افزایش فشار بر روی دیواره های انحنادار لوله اسکوپ می شود. پس از عبور مولکول ها از انحنای اسکوپ و با کاهش تعداد برخوردهای مولکولی با سطح درون اسکوپ، فشار درون لوله مجدداً کاهش می یابد.



که در مقایسه دو شکل ۶-الف و ۶-ب نیز مشاهده می‌شود، به دلیل برخورد سیال با ماخ شدیدتر به دهانه ورودی اسکوپ محصول، جریان محوری شکل گرفته در اطراف آن نیز دارای دامنه وسیع‌تری نسبت به اسکوپ پسماند می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۶. نمایش خطوط جریان حاصل از شوک ایجاد شده در دهانه ورودی اسکوپ پسماند، (ب) اسکوپ محصول.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

مقادیر میانگین ضرایب انطباق مومنتوم مماسی ( $\sigma_T$ ) برای اسکوپ محصول و پسماند به ترتیب برابر با ۰٫۸۳ و ۰٫۹۲ تعیین گردید.

با توجه به فاصله کم‌تر اسکوپ محصول تا دیواره نسبت به اسکوپ پسماند، میزان اختلاف سرعت چرخشی سیال اطراف اسکوپ محصول و سیال روی بدنه اسکوپ به ازای ارتفاع  $(\frac{du_\theta}{dz})$  بیش‌تر از این اختلاف برای اسکوپ پسماند می‌باشند. با توجه به این‌که ضریب انطباق مومنتوم مماسی در اسکوپ محصول کم‌تر از اسکوپ پسماند تعیین شده است، هم‌چنین با توجه به بیش‌تر بودن مقدار  $(\frac{du_\theta}{dz})$  برای اسکوپ محصول، مقدار

شکل ۶، خطوط جریان و شوک اطراف اسکوپ پسماند و اسکوپ محصول را نمایش می‌دهد. به دلیل سرعت بالای دیواره روتور، جریان مافوق صوت با ماخ بالا به اسکوپ برخورد می‌کند و پدیده شوک در اطراف اسکوپ رخ می‌دهد. بر اثر رخ دادن شوک، قبل از اسکوپ، فشار افزایش و سرعت کاهش می‌یابد. پس از اسکوپ نیز فشار افت پیدا می‌کند و به مقدار سرعت چرخشی مولکول‌های گاز افزوده می‌شود.

پس از برخورد مولکول‌ها با سرعت چرخشی به ضخامت سر اسکوپ، از سرعت چرخشی آن‌ها کاسته شده و سرعت آن‌ها به صفر نزدیک می‌شود و مابقی مولکول‌های برخورد کرده به سر اسکوپ نیز از دریچه اسکوپ به سمت بیرون هدایت می‌شوند. با گذشت زمان سایر مولکول‌های متحرک به مولکول‌های ساکن برخورد می‌کنند و با انتقال بخشی از انرژی جنبشی خود به آن‌ها، باعث به حرکت در آمدن آن‌ها نیز خواهند شد. بخشی از مولکول‌های برخورد کرده به دیواره انحنا دار اسکوپ نیز، از مسیر انحنای خمشی اسکوپ به سمت محور روتور هدایت می‌شوند و هم‌زمان در راستای Z، در دو جهت بالا و پایین اسکوپ حرکت می‌کنند. به همین دلیل شکل هندسی و شعاع انحنای اسکوپ در نحوه هدایت مسیر مولکول‌های گاز در جریان محوری و شعاعی، اهمیت بالایی دارد.

همان‌طوری که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، مولکول‌هایی که در جهت بالای اسکوپ پسماند حرکت می‌کنند به کپ بالا برخورد کرده و مجدداً در راستای چرخش روتور شروع به حرکت می‌کنند. در صورتی که مولکول‌هایی که پس از برخوردشان با اسکوپ پسماند در جهت پایین حرکت می‌کنند، موجب شکل‌گیری جریان محوری در راستای روتور می‌شوند.

در اسکوپ محصول نیز همان‌طوری که در شکل ۶-ب نمایش داده شده است، مولکول‌هایی که در جهت پایین حرکت می‌کنند، با برخوردشان به کپ پایین، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به صورت چرخشی به حرکت خود ادامه می‌دهند. در صورتی که مولکول‌هایی که در جهت بالای اسکوپ محصول حرکت می‌کنند، با برخوردشان به بفل، حرکت محوری آن‌ها مجدداً به حرکت چرخشی تبدیل می‌شود. مولکول‌هایی که قطر داخلی بفل را طی می‌کنند، قادر به حرکت مجدد به محفظه جداسازی خواهند بود. این مولکول‌ها پس از ورود مجدد به محفظه جداسازی و پیوستن به مولکول‌های ناحیه مولکولی این محفظه، تحت تأثیری نیروی گریز از مرکز در قسمت بالای بفل تجمع می‌یابند و به گاز درون محفظه جداسازی روتور ملحق می‌شوند.

با توجه به این‌که فاصله اسکوپ محصول تا دیواره حدود یک سوم فاصله اسکوپ پسماند در نظر گرفته شده است و همان‌طور



8. Jiang D, Zeng S. DSMC simulation of feed jet flow in gas centrifuge. *Atomic Energy Science and Technology. Department of Engineering Physics*. 2011;398-401.
9. Khajenoori M, Haghghi A, Safdari J, Norouzi A. Modeling and simulating of feed flow in a gas centrifuge using the Monte Carlo method to calculate the maximum separation power. *Journal of Molecular Modeling*. 2019;25:333.
10. Yousefi-Nasab S, Safdari J, Karimi-Sabet J, Norouzi A. Study of scoop drive and polymeric surface effects on the separation factors for a gas centrifuge using MD-DSMC method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021;43(7):1-16.
11. Ghazanfari V, Salehi A.A, Keshtkar A.R, Shadman M.M, Askari M.H. Investigation of the continuum-rarefied flow and isotope separation using a hybrid CFD-DSMC simulation for  $UF_6$  in a gas centrifuge. *Annals of Nuclear Energy*. 2021;152:107985.
12. Khajenoori M, Safdari J, Haghghi Asl A, Norouzi A. Modeling gas-granular flow in molecular using the DSMC method and continuum regions by Onsager's pancake equation with mass sources and sinks in a rotating cylinder. *Granular Matter*. 2019;21(3):63.
13. Wang M, Zhixin Li. Gas mixing in microchannels using the direct simulation Monte Carlo method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006;49(9-10):1696-1702.
14. Roohi E, Darbandi M. Hybrid DSMC/Navier-Stokes solution of rarefied micro-nano flows. *Proceedings of the 2nd GASMEMS Workshop-Les Embiez*. 2010.
15. www.OpenFOAM.org, [Online].
16. White C, Matthew K.B, Thomas J.S, Stephen M.L, Benzi J, David R.E, Jason M.R. dsmcFoam+: An OpenFOAM based direct simulation Monte Carlo solver. *Computer Physics Communications*. 2018;224:22-43.
17. Borgnakke C, Poul S.L. Statistical collision model for Monte Carlo simulation of polyatomic gas mixture. *Journal of computational Physics*. 1975;18(4):405-420.
18. Yousefi-Nasab S, Safdari J, Karimi-Sabet J. Prediction of mole fraction distribution of various gases using dsmcFoam solver for the simulation of a stepped molecular pump under different operating conditions. *Vacuum*. 2022;111224.
19. Yousefi nasab S, Karimi sabet J, Safdari J, Amini E, Norouzi A. Investigation gas behavior inside a gas centrifuge using dsmc code developed and dsmcFOAM solver. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022;98(1):54-63 [In Persian].

نیروی درگ برشی برای اسکوپ محصول برابر با ۲۱۴۰ دین و نیروی درگ اسکوپ پسماند برابر با ۱۸۶۰ دین تعیین شد. با وجود تمامی تأثیرات سرعت، فشار، دما و فاصله ورودی اسکوپ از دیواره روتور بر نیروی درگ، مشاهده گردید که این مقادیر در اسکوپ پسماند نسبت به اسکوپ محصول متفاوت می‌باشد. در نتیجه با توجه به برآیند تأثیرگذاری هر یک از این مقادیر بر نیروی درگ مشخص شد که مقدار نیروی درگ در اسکوپ محصول از نیروی درگ در اسکوپ پسماند بیش‌تر است. علاوه بر موارد مذکور مشاهده شد که قسمت اصلی جریانی که به سر اسکوپ محصول برخورد می‌کند و می‌تواند بر جریان محوری بیش‌ترین تأثیر را داشته باشد، توسط بفل خنثی می‌شود و ما بقی جریان برخوردی به سر اسکوپ که به ناحیه رژیم جریان مولکولی هدایت می‌شود، به جریان درون محفظه جداسازی ملحق می‌گردد.

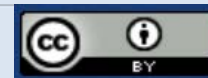
میزان لغزش سیال در کنار سطح می‌تواند نشان‌دهنده پارامتر لغزش سرعت باشد که در نتایج این شبیه‌سازی بر اساس سرعت شکل گرفته در ناحیه اسکوپ محصول برابر با ۱۰ متر بر ثانیه تعیین شد.

## مراجع

1. Benedict M, Levi H, Pigford T. Nuclear chemical engineering. *Nuclear Science and Engineering*. 1982;82(4).
2. Bird G.A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. *New York: Oxford Univ*. 1994.
3. Bird G. The DSMC Method. *Libraries Australia. Australia*. 2013.
4. Bogovalov S.V, Kislov V.A, Tronin I.V. Waves in strong centrifugal fields: dissipationless gas. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2015;29(1):111-125.
5. Jiang D, Zeng S. CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge. *In International Conference on Nuclear Engineering*. 2006;42452:403-408.
6. Borman V.D, Bogovalov S.V, Borisevich V.D, Tronin I.V, Tronin V.N. The computer simulation of 3d gas dynamics in a gas centrifuge. *In Journal of Physics*. 2016;751(1):12017.
7. Roblin P, Doneddu F. Direct monte-carlo simulations in a gas centrifuge. *AIP Proceedings*. 2001.

### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

باصیری، صبا، صفدری، سیدجابر، قریشی، سیدمحمد، یوسفی‌نسب، صادق. (۱۴۰۳)، بررسی عوامل مؤثر بر نیروهای وارده بر اسکوپ در یک ماشین سانتریفیوژ گازی در شرایط سه‌بعدی با روش DSMC. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۷(۱)، ۱۳۴-۱۴۴. DOI: 10.24200/nst.2023.1258.1819

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1553.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1553.html)

