

بررسی نحوه تاثیرگذاری محفظه محصول و جداسازی بر یکدیگر در یک ماشین سانتریفیوژ

گازی در شرایط سه بُعدی با روش DSMC

INC29-1336

صبا باصیری^{۱*}، سیدمحمد قریشی^۱، سیدجابر صفدری^۲، صادق یوسفی‌نسب^۲

۱. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی: ۱۶۳۹-۱۱۱۵۵، اصفهان-ایران.

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

چکیده:

نحوه تاثیرگذاری محفظه محصول و جداسازی بر یکدیگر در طراحی ساختار بفل، هندسه اسکوپ محصول و فاصله اسکوپ محصول تا دیواره روتور و ... در راستای افزایش میزان غنی‌سازی سانتریفیوژ گازی، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با این هدف، شبیه‌سازی حاضر در شرایط سه بُعدی با روش DSMC انجام شد. با استفاده از این شبیه‌سازی، امواج شوک در ناحیه اسکوپ محصول به صورت واقعی نمایش داده شد و با بررسی دامنه این امواج، میزان ارتباط‌گیری دو محفظه محصول و جداسازی و نقش بفل در این ارتباط‌گیری مورد مطالعه قرار گرفت. در شبیه‌سازی‌های دو بُعدی انجام شده تا کنون فرض بر عدم تاثیرگذاری محفظه محصول بر محفظه جداسازی و خنثی شدن اثر نیروی درگ اسکوپ محصول، توسط بفل بود. نتایج نشان داد که بر خلاف این فرض؛ بفل، باعث حذف کامل اثر اسکوپ محصول در نقش محرک مکانیکی نشده و اثر نیروی درگ آن را خنثی نمی‌کند.

کلیدواژه‌ها: محفظه محصول و جداسازی، اسکوپ محصول، شبیه‌سازی سه بُعدی، سانتریفیوژ گازی، روش DSMC

Investigating how the product and separation chambers influence each other in a gas centrifuge machine in three-dimensional conditions with the DSMC method.

S. Basiri^{1*}, S. M. Ghoreishi¹, J. Safdari², S. Yousefi-nasab²

1. Isfahan University of Technology (IUT), Department of Chemical Engineering, P.O.Box:8415683111, Isfahan, Iran.

2. Nuclear Science and Technology Research Institute, Nuclear Fuel cycle Research School, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.Box:11365-08486, Tehran, Iran.

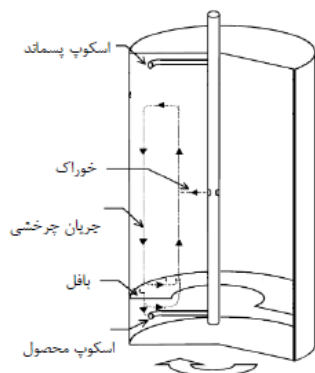
Abstract:

The effect of the product and separation chambers in the design of the baffle structure, the geometry of the product scoop and the distance of the product scoop to the rotor wall, etc., are of great importance in order to increase the enrichment rate of the gas centrifuge. With this purpose, the current simulation was performed in 3D conditions with the DSMC method. By using this simulation, the shock waves in the area of product were displayed realistically and by examining the domain of these shock waves, the degree of communication between the two product and separation chambers and the role of the baffle in this communication were studied. In the 2D simulations carried out so far, it was assumed that the product chamber does not effect the separation chamber and that the effect of the drag force of the product scoop is neutralized by the baffle. The results showed that, contrary to this assumption, the baffle does not completely remove the effect of the product scoop and neutralize the effect of its drag force.

Keywords: Product And Separation Chambers, Product Scoop, 3D Simulation, Gas Centrifuge, DSMC Method

۱. مقدمه:

در سال‌های اخیر تقاضا برای تولید ایزوتوپ‌های پایدار با غنای بالا افزایش یافته است. یکی از روش‌هایی که برای جدا سازی ایزوتوپی و افزایش غنای ایزوتوپ‌های خاص به مرحله صنعتی رسیده است، روش جدا سازی با استفاده از سانتریفیوژ گازی می‌باشد. کاربرد اصلی سانتریفیوژهای گازی، جداسازی ایزوتوپی و جداسازی گازهای چندجزئی برای اهداف مختلف در علوم شیمی، فیزیک، مواد و پزشکی می‌باشد [۱]. کاربردهای عمده سانتریفیوژ گازی در فرآیند صنعتی می‌توان به غنی سازی اورانیوم اشاره کرد. فرآیند جدا سازی به کمک سانتریفیوژ گازی از اصل نیروی گریز از مرکز به منظور ایجاد گرادیان دانه سسته در گاز حاوی اجزایی با وزن مولکولی متفاوت، استفاده می‌کند. یک سانتریفیوژ گازی اساساً سیلندر عمودی و توخالی است که در سرعت زاویه‌ای بالایی در داخل یک پوسته تخلیه شده خلأ و در محیطی با اصطکاک کم، حول محور خود می‌چرخد و خوراک گازی به آن تغذیه می‌شود [۲]. این خوراک گازی شامل گاز با ترکیبی از دو یا چند جزء یا ایزوتوپ، وارد روتور می‌شود و توسط نیروی گریز از مرکز، جداسازی می‌گردد. بدلیل نفوذ فشاری موجود در داخل روتور، ترکیبات سنگین نزدیک به دیواره، اجزای سبک‌تر نزدیک محور روتور و گازهای با جرم مولکولی متوسط در لایه‌ای بین این دو قرار گرفته است. در نتیجه جداسازی شعاعی بین ایزوتوپ‌های گاز رخ می‌دهد [۳]. با توجه به پایین بودن میزان ضریب جدا سازی شعاعی، محرک‌هایی جهت ایجاد و تقویت جریان محوری در ساختار ماشین سانتریفیوژ قرار داده می‌شود. این محرک‌ها شامل محرک‌های اسکوپ محصول و پسماند، گرادیان دمای دیواره، میزان اختلاف دمای بین دو کپ بالا و پایین و ... می‌باشند [۴]. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از یک ماشین سانتریفیوژ و جریان محوری شکل گرفته درون آن نمایش داده شده است.



شکل ۱. طرح‌واره یک ماشین سانتریفیوژ گازی [۵]

یکی از مهمترین محرک‌ها، اسکوپ می‌باشد که در اثر برخورد مولکول‌های گاز به بدنه آن سرعت مولکول‌های گاز از سرعت صوت بیشتر شده و امواج شوک رخ می‌دهد [۶].

به منظور طراحی بهینه ماشین‌های سانتریفیوژ گازی، به شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های مختلف مانند روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو^۲ و ... در شرایط دو و سه بُعدی پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی‌های دو بُعدی انجام شده تاکنون فرض بر عدم تاثیر محفظه محصول بر محفظه جداسازی و خنثی شدن اثر نیروی درگ اسکوپ محصول، توسط بفل بوده است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی سه بُعدی به بررسی این فرض پرداخته شده است. با توجه به عدم نمایش امواج شوک سه بُعدی شکل گرفته در ناحیه ورودی و بدنه اسکوپ در شبیه‌سازی‌های دو بُعدی [۵]، شبیه‌سازی حاضر با دو هدف اصلی زیر انجام گرفت: اول اینکه با استفاده از شبیه‌سازی در شرایط سه بُعدی، امواج شوک در ناحیه اسکوپ محصول به صورت واقعی نمایش داده‌شد، دوم اینکه با بررسی دامنه

^۱ Computational Fluid Dynamic (CFD)

^۲ Direct Simulation Mont Carlo (DSMC)

این امواج، میزان تاثیرگذاری دو محفظه محصول و جداسازی بر یکدیگر و نقش بفل در این تاثیرگذاری مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی سه بُعدی ماشین سانتریفیوژ:

۱.۲. هندسه و شبکه‌بندی:

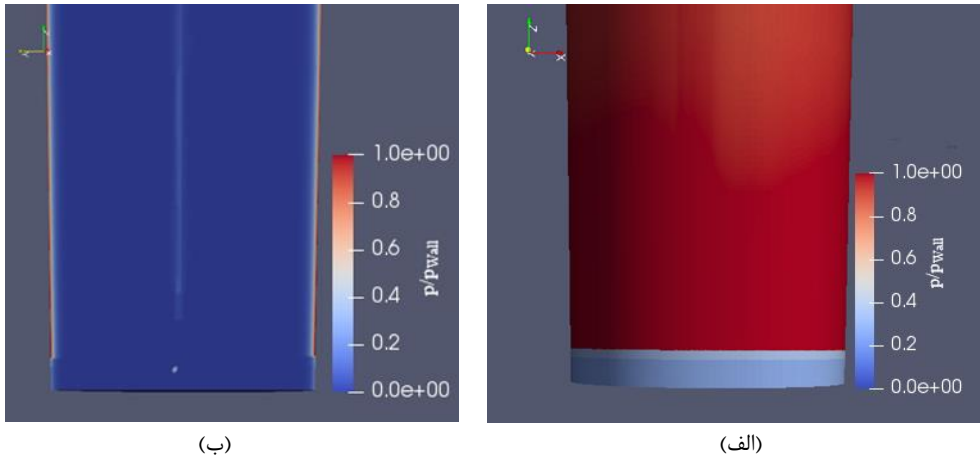
هندسه و شبکه‌بندی سه بُعدی ماشین سانتریفیوژ، با استفاده از نرم افزار Gambit ترسیم گردید. در این شبکه‌بندی از دو نوع شبکه ساختاریافته و غیر ساختاریافته به صورت ترکیبی استفاده شد. جهت کاهش میزان خطا، شبکه‌های کنار دیواره کوچکتر از میانگین پویش آزاد (کمتر از $10^{-3} \times 1/236$ متر) در نظر گرفته شدند. پس از انجام تست استقلال از شبکه، تعداد کل شبکه برابر با ۷۳۷۵۶۷۵ به عنوان تعداد بهینه انتخاب گردید.

۲.۲ تعیین شرایط مرزی و اولیه:

- شرط مرزی ورودی سرعت با اعمال "flowRateInletVelocity" به عنوان شرط مرزی ورودی خوراک به داخل روتور و شرط مرزی "flowRateOutletVelocity"، به عنوان شرایط مرزی خروجی سرعت یعنی خروجی اسکوپ‌های محصول و پسماند، تنظیم شده است. شرط مرزی سرعت برای سطوح ثابت، "fixedValue" و برای سطوح چرخشی، "rotatingWallVelocity" تعیین گردید. شرط مرزی "zeroGradient" نیز به عنوان شرط مرزی سرعت برای سایر مرزهای مجهول، اعمال شده است.
- شرط مرزی دما با استفاده از اعمال گرادیان خطی دمایی در دیواره روتور تنظیم گردید. به طوری که دما روی دیواره روتور از مقدار مرجع ۳۰۰ کلوین شروع و در راستای طول روتور (Z) به اندازه ۳۵ کلوین افزایش یافته است.

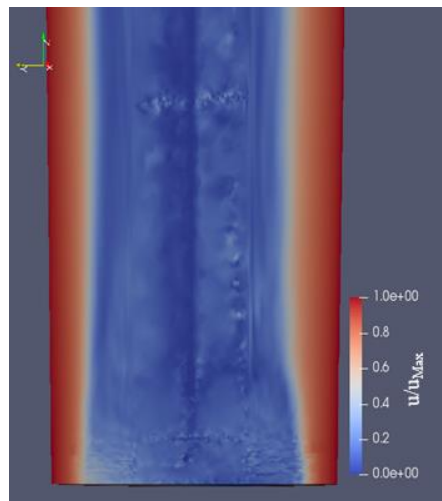
۳. نتایج:

در شکل ۲-الف از جداره بیرونی روتور و در شکل ۲-ب در برش محوری از مرکز روتور، تغییرات فشار در ناحیه بالا و پایین بفل نمایش داده شده است. معیار میزان تجمع مولکول‌های گاز در کنار دیواره در بالای بفل، ضخامت بفل و در زیر بفل؛ فاصله اسکوپ محصول تا دیواره‌ی روتور می‌باشد. همانطوری که در شکل ۲ نشان داده شده است، فشار در زیر بفل از فشار در محفظه جداسازی کمتر می‌باشد. از آنجا که محفظه‌ی محصول به واسطه‌ی بفل از محفظه‌ی اصلی جدایش، مجزا می‌شود، فشار آن افت می‌کند؛ بنابراین اسکوپ محصول تا حد امکان به دیواره‌ی روتور نزدیک می‌شود تا بتوان از حداکثر فشاری که در محفظه‌ی محصول وجود دارد، بهره گرفت و محصول را از طریق اسکوپ جمع‌آوری نمود. از طرفی تعداد مولکول‌هایی که در بالای بفل قرار دارند، بسیار بیشتر از مولکول‌های موجود در زیر بفل می‌باشند، در نتیجه به دلیل اعمال نیروی گریز از مرکز به ذرات و به دنبال آن تراکم بالاتر ذرات در نزدیکی دیواره روتور در قسمت بالای بفل، فشار در این ناحیه بیشتر است. همچنین در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود که با فاصله از دیواره به سمت محور و کاهش تجمع ذرات، فشار نیز کاهش یافته است در صورتی که با توجه به قرارگیری جرم ناچیز گاز در ناحیه مرکزی روتور، در این نواحی نیز گرادیان فشار جزئی وجود دارد.



شکل ۲. تغییرات فشار در محدوده اتصال محفظه محصول و جداسازی

در شکل ۳، تغییرات سرعت در محدوده اتصال محفظه جداسازی و محصول نمایش داده شده است. به دلیل بالا بودن سرعت دیواره (V_{wall}) و سرعت گرمای مولکول‌ها ($V_{\text{Thermal}} = 200 \text{ m/s}$) در قسمت بالای بفل، زمان تبادل اطلاعات بین مولکول‌های سطح و مولکول‌های گاز نسبتاً کوتاه می‌باشد و مولکول‌های گاز فرصت خیلی کمی جهت تبادل اطلاعات سرعت با سطح را دارند، پس فقط بخشی از اطلاعات سرعت توسط مولکول‌ها در یک برخورد با سطح برداشت می‌شود. اما از طرفی چون این ناحیه، چگال می‌باشد احتمال برخورد مولکول‌ها با یکدیگر بسیار بالاست، در نتیجه احتمال اینکه مولکول مجدداً با دیواره برخورد کنند تا حدودی زیاد می‌باشد. با توجه به شکل ۳ در نهایت با پایا شدن سیستم، مشاهده شده است که مولکول‌ها سرعتی برابر با سرعت دیواره را به خود گرفته‌اند. اما با توجه به اینکه در ناحیه زیر بفل، تعداد مولکول‌ها کمتر است، پس احتمال برخوردهای چندگانه با سطح نیز کمتر بوده و در نتیجه احتمال شکل گرفتن سرعت سیال برابر با سرعت سطح، کاهش می‌یابد.

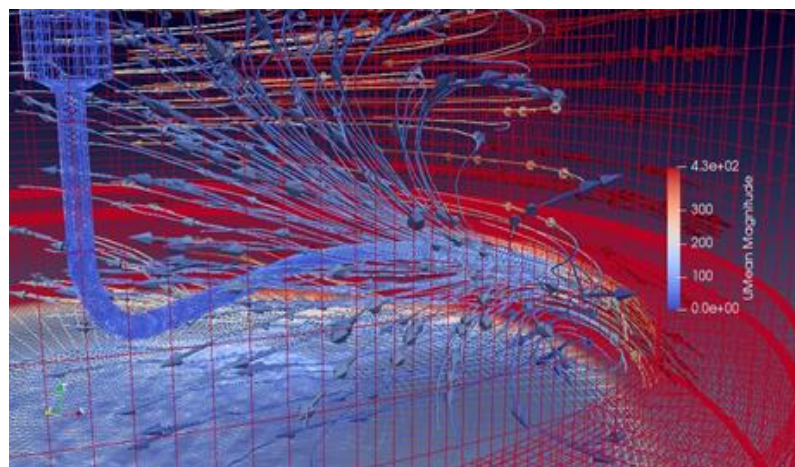


شکل ۳. تغییرات سرعت در محدوده اتصال محفظه محصول و جداسازی

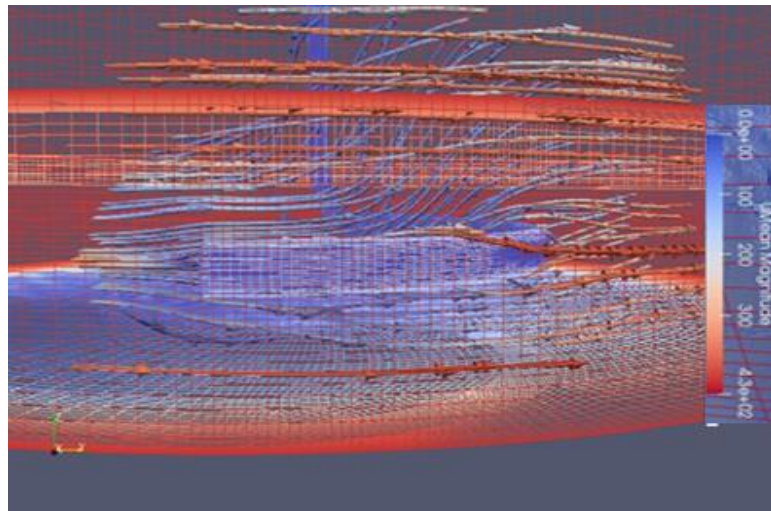
به جهت وسعت میدان دید، شکل ۴-الف و ۴-ب خطوط جریان در امواج شوک و حرکت جریان را پس از برخورد مولکول‌های گاز به ورودی و بدنه اسکوپ محصول، از دو زاویه داخلی و بیرونی اسکوپ نمایش می‌دهند. در یک ماشین سانتریفیوژ، ابتدا روتور به سرعت نهایی می‌رسد، سپس تزریق خوراک آغاز شده و از نقطه تزریق تا رسیدن به دیواره روتور را تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز طی می‌کند. تا زمانی که گاز تزریقی توسط حفره خوراک، صرف تجمع مولکول‌های

گاز در کنار دیواره روتور ماشین شود، گاز از اسکوپ‌های محصول و پسماند برداشت نخواهد شد. زمانی این لایه تجمعی در کنار دیواره روتور ماشین سانتیفریوژ شکل می‌گیرد که ضخامت این لایه، کمتر و مساوی ضخامت بفل باشد. در این فرآیند زمانی ممکن است مولکول گاز در کنار دیواره روتور، چندین حرکت رفت و برگشتی از بالا به پایین و برعکس را در اثر حضور محرک‌ها بویژه محرک حرارتی طی کند، تا بالاخره بتواند از ضخامت بفل عبور کرده و از طریق اسکوپ محصول خارج شود. مدت زمانی که مولکول در محفظه جداسازی در این رفت و برگشت‌ها به دام می‌افتد، باعث جداسازی ایزوتوپ‌های یک عنصر می‌شود. به همین دلیل محفظه بالای بفل را محفظه جداسازی می‌نامند. در شبیه‌سازی‌های دو بُعدی فرض بر استفاده از بفل به منظور حذف نقش محرک مکانیکی اسکوپ محصول، جلوگیری از تداخل جریان و عامل جداساز بین محفظه جداسازی و محصول شده است.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه بُعدی در شکل ۴، مشاهده می‌شود که بفل به عنوان سدی مقابل راه‌یابی مقدار زیادی از جریان متراکم در کنار دیواره روتور، از محفظه جداسازی به محفظه محصول قرار می‌گیرد. قطع مقدار زیادی از جریان توسط بفل، همانطوری که در شکل ۲ نیز مشاهده شد، باعث افت فشار در محفظه محصول می‌گردد. از طرفی در اسکوپ محصول همانطوری که در شکل ۴-الف و ۴-ب نمایش داده شده است، مولکول‌های حرکت‌کننده به جهت پایین، با برخورد به کپ پایین و تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز، به صورت چرخشی به حرکت خود ادامه می‌دهند. حرکت محوری مولکول‌های هدایت‌شونده در جهت بالای اسکوپ محصول، پس از برخورد به بفل، مجدداً به حرکت چرخشی تبدیل می‌شود. در صورتی که 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 تاثیری نیروی گریز از مرکز در قسمت بالای بفل تجمع می‌یابند و به گاز درون محفظه جداسازی روتور ملحق می‌شوند. تجمع این مولکول‌ها در این نقطه باعث تقویت جریان محوری می‌شود. در نتیجه بفل باعث حذف نقش محرک مکانیکی اسکوپ محصول نشده و اثر نیروی درگ آن را خنثی نمی‌کند. حتی با وجود بفل نیز ارتباط جریانی بین محفظه محصول و جداسازی وجود دارد. این در صورتی است که بواسطه امواج شوک شکل گرفته در دهانه اسکوپ محصول، تعدادی از مولکول‌ها از محفظه محصول به محفظه جداسازی راه می‌یابند. همچنین در محفظه جداسازی نیز، مولکول‌های عبورکننده از ضخامت بفل، روانه محفظه محصول می‌شوند. زمانی که گاز شروع به عبور از ضخامت بفل می‌کند، سیستم پایا شده و میزان دبی ورودی خوراک با مجموع دبی‌های خروجی از طریق اسکوپ‌های محصول و پسماند برابر می‌باشد. میزان خروج مولکول‌ها از طریق دریچه اسکوپ پسماند نسبت به میزان مولکول‌های ورودی خوراک باعث شکل‌گیری پارامتری به نام میزان برش ($cut = \dot{m}_{product} / \dot{m}_{feed}$) می‌شود که پس از شبیه‌سازی برابر ۰/۴۵ به دست آمد.



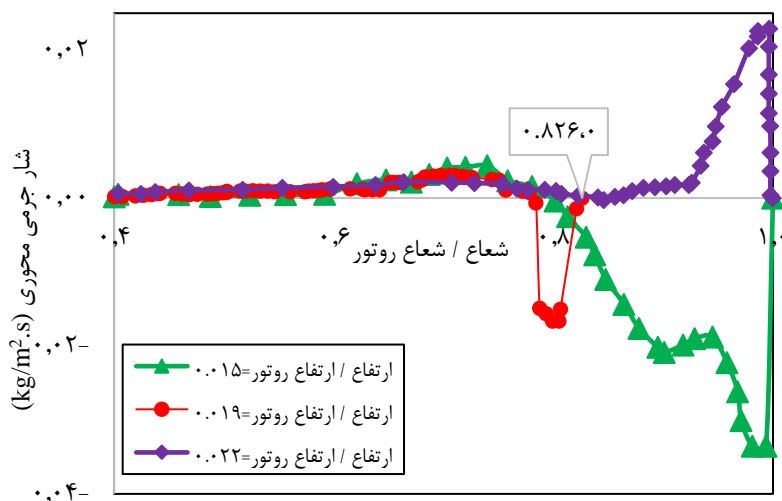
(الف)



(ب)

شکل ۴. خطوط جریان در امواج شوک و جهت حرکت جریان در اسکوپ محصول

شکل ۵، نمودار شار جرمی محوری در ناحیه بفل (ارتفاع / ارتفاع روتور = ۰/۰۱۹)، بالای بفل (ارتفاع / ارتفاع روتور = ۰/۰۲۲) و زیر بفل (ارتفاع / ارتفاع روتور = ۰/۰۱۵) را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در این نواحی، گازهای موجود در ناحیه مرکزی روتور دارای مقادیر مشخصی سرعت محوری می‌باشند. ناحیه مثبت نمودار نشان‌دهنده حرکت رو به بالای جریان و ناحیه منفی نشان‌دهنده حرکت رو به پایین جریان، در راستای محوری روتور است. هنگامی که مولکول‌های در حال چرخش، به دهانه ورودی و انحنا بدنه اسکوپ برخورد می‌کنند، از مسیر خود منحرف شده و به سمت بالای محفظه محصول هدایت می‌شوند. در ناحیه نزدیک به شعاع داخلی بفل (شعاع داخلی بفل / شعاع روتور = ۰/۸۲۶)، به دلیل عبور مولکول‌های گاز از ضخامت بفل مقادیر سرعت محوری منفی می‌باشد. مشخص است که در ناحیه زیر بفل، اسکوپ محصول عامل تقویت کننده شار بوده است.



شکل ۵. تغییرات شار جرمی محوری در ناحیه بفل و اطراف آن

۴. نتیجه‌گیری:

پس از انجام شبیه‌سازی نتایج زیر حاصل شد:

- بفل به عنوان سدی مقابل راه یابی مقدار زیادی از جریان متراکم در کناره دیواره روتور از محفظه جداسازی به محفظه محصول قرار می‌گیرد. قطع مقدار زیادی از جریان توسط بفل، باعث افت فشار در محفظه محصول می‌گردد.
- بفل، باعث حذف نقش محرک مکانیکی اسکوپ محصول نشده و اثر نیروی درگ آن را خنثی نمی‌کند. حتی با وجود بفل نیز ارتباط جریانی بین محفظه محصول و جداسازی وجود دارد. این در صورتی است که بواسطه امواج شوک شکل گرفته در دهانه اسکوپ محصول، تعدادی از مولکول‌ها از محفظه محصول به محفظه جداسازی راه می‌یابند. همچنین در محفظه جداسازی نیز، مولکول‌های عبور کننده از ضخامت بفل، روانه محفظه محصول می‌شوند.
- مشخص شد که گازهای موجود در ناحیه مرکزی روتور، دارای مقادیر مشخصی سرعت محوری می‌باشند. هنگامی که مولکول‌های در حال چرخش، به دهانه ورودی و انحنای بدنه اسکوپ برخورد می‌کنند، از مسیر خود منحرف شده و به سمت بالای محفظه محصول هدایت می‌شوند. در ناحیه نزدیک به شعاع داخلی بفل (شعاع داخلی بفل / شعاع روتور = ۰/۸۲۶)، به دلیل عبور مولکول‌های گاز از ضخامت بفل مقادیر سرعت محوری منفی می‌باشد. در ناحیه زیر بفل، اسکوپ محصول عامل تقویت‌کننده شار بوده است.

مراجع:

1. A. Norouzi, *Parameters optimization of a counter-current cascade based on using a real coded genetic algorithm*, Separation Science and Technology, **46**, pp. 2223-2230, 14(2011).
2. Nathan H. (Nate) Hurt, William J. Wilcox, Jr., "*Handbook of Nuclear engineering*", 2009.
3. V. Ghazanfari et al. *OpenFoam application for numerical simulation of thermal drive effect on gas flow in a gas centrifuge for total reflux*, Journal of Nuclear Science and Technology (JonSat), **41**, 152 (2020). (in Persian)
4. T. Kai. *Basic characteristics of centrifuges, (III) analysis of fluid flow in centrifuges*, Journal of Nuclear Science and Technology, **14**, 267 (1976).
5. D. Jiang and S. Zeng, in: *International Conference on Nuclear Engineering, CFD simulation of 3D flowfield in a gas centrifuge*, (2006).
6. H. G. Wood et al. *Onsager's pancake approximation for the fluid dynamics of a gas centrifuge*, J. Fluid Mech, **34**, pp. 299-311, 1980(2009).