

شبیه سازی فضای کل بین روتور و بدنه یک ماشین سانتریفیوژ با استفاده از روش DSMC

صادق یوسفی نسب^{(۱)*} - سید جابر صفدری^(۱) - جواد کریمی ثابت^(۲) - محمد حسن ملاح^(۱) - مسعود خواجه نوری^(۱) - محمد حسین عسکری^(۱) - حامد واحدی^(۱)

(۱) سازمان انرژی اتمی - شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

(۲) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

چکیده

گاز درون ماشین سانتریفیوژ شامل گاز درون روتور و خارج روتور می‌باشد. گاز درون روتور به دلیل چرخش بالای روتور فرآیند جداسازی گاز درون آن رخ می‌دهد. گاز بیرون روتور به دلیل ایجاد اصطکاک بین گاز و دیواره چرخان یک عامل افزایش دهنده مقدار توان مصرفی روتور محسوب می‌شود که با قرار دادن قطعه‌ای به نام پمپ مولکولار در فضای فوقانی ماشین، اکثریت گازهای واقع شده در این فضا به سمت بالای پمپ حرکت می‌کنند. در این مقاله به شبیه سازی کل فضای بین روتور و بدنه یک ماشین سانتریفیوژ فرضی با استفاده از روش DSMC پرداخته شد. نسبت تراکم پمپ مولکولار برای گاز هوا در این حالت برابر با ۸۰۰ و برای پمپ مولکولار مجزا حدود ۸۶۹ تعیین شد که با مقایسه نسبت تراکم ایجاد شده بین این دو حالت، مشاهده شد که نتایج دارای انطباق خوبی با یکدیگر می‌باشند و مقدار اختلاف آن‌ها از یکدیگر حدود ۸٪ خواهد بود.

کلید واژه‌ها: ماشین سانتریفیوژ، روش DSMC، پمپ مولکولار، نسبت تراکم، فضای کل بین روتور و بدنه

Simulation of the total space between the rotor and the casing of a centrifuge using the DSMC method

S. Yousefi-Nasab^{(1,2)*}, J. Safdari^(1,2), J. Karimi-Sabet⁽²⁾, M.H. Mallah^(1,2), M. Khajenoori⁽¹⁾, M.H. Askari⁽¹⁾, H. Vahedi⁽¹⁾

(1) Atomic Energy Organization of Iran, Iran Advanced Technologies Company

(2) Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Material and Nuclear Fuel Research School

Abstract:

Gas inside the centrifuge includes gas inside the rotor and outside the rotor. Gas inside the rotor due to the high rotation of the rotor, the process of separating the gas inside it occurs. The gas outside the rotor is a factor that increases the amount of power consumed by the rotor due to the friction between the gas and the rotating wall that by placing a piece called a molecular pump in the upper space of the car, most of the gases in this space move to the top of the pump. In this paper, the total space between the rotor and the casing of a hypothetical centrifuge machine is simulated using the DSMC method. The compression ratio of the molecular pump for air gas in this case was equal to 800 and for the separate molecular pump was about 869. By comparing the compression ratio created between the two modes, it was observed that the results were in good agreement with each other and the difference between them will be about 8%.

Keywords: Gas centrifuge, DSMC method, Molecular pump, Compression ratio, Space between rotor and casing

Email: syousefy@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت خلاء فضای بین روتور و بدنه در مقدار توان مصرفی ماشین و همچنین مقدار دمای قطعات حساس روتور و میزان ویسکوزیته روغن دمپر یاتاقان ماشین، طراحی یک پمپ مولکولار مناسب که بتواند این خلاء را در محدوده مناسب خود نگه دارد بسیار مهم است. در صورت حفظ نشدن خلاء مورد نیاز برای فضای بین روتور و بدنه، کرش شدن ماشین قطعی است. به همین دلیل شبیه سازی فضای بیرون روتور جهت تعیین مقدار فشار شکل گرفته در فضای بین روتور و بدنه در صورت حضور یک پمپ مولکولار داری اهمیت بالایی است. با تعیین روند تغییرات فشار در فضای بیرونی روتور، می توان توان مصرفی فضای بیرونی روتور را نیز تعیین کرد. در واقع یکی از مهمترین قطعات برای فضای بین روتور و بدنه، قطعه پمپ مولکولار است. به این منظور ساوادا در سال ۱۹۹۹ [۱] با ترکیب معادلات ناویر استوکس با اعمال شرط مرزی لغزشی و معادلات حاکم بر رژیم جریان کاملاً مولکولی (تئوری نادسن) و در انتها ترکیب آن دو با استفاده از یک ضریب k که خود وابسته به عدد نادسن بود به حل معادلات واقع شده در رژیم جریان گذرای بالای یک پمپ هلیکال پرداخت.

سیکافوس در سال ۱۹۶۱ [۲] به بررسی مقدار نسبت تراکم در یک شیار هلیکال مستطیلی برای روتورهای با سرعت محیطی پایین پرداخت (سرعت محیطی روتور کمتر از میانگین سرعت مولکولی گاز باشد) و نسبت تراکم را برای ابعاد هندسی مختلف از یک پمپ مولکولار با شیار مستطیلی و برای گاز هوا مورد مقایسه قرار داد. در این روش، نتایج آن در سرعت‌های محیطی بالا برای روتور، اختلاف قابل توجهی با مقادیر واقعی دارد که دلیل اصلی آن استفاده از مقدار سرعت محیطی روتور به جای سرعت رانشی گاز درون شیار می‌باشد. به همین دلیل یوسفی‌نسب و همکارانش با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مولکولی پمپ با روش DSMC [۳،۴]، مقدار ضریب لغزشی مورد استفاده در معادلات سیکافوس اصلاح کردند [۵]. با توجه به اینکه شبیه سازی یک پمپ مولکولار منفرد نیاز به اعمال شرایط مرزی برای آن دارد که این خود می‌تواند موجب انحراف نسبت تراکم حاصل از شبیه سازی با مقدار نسبت تراکم واقعی پمپ شود، در این مقاله به شبیه سازی کل فضای بیرونی روتور با استفاده از روش DSMC پرداخته می‌شود. در انتها نتایج آن با نتایج بدست آمده از شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد نیز مورد مقایسه واقع می‌شود و میزان اختلاف بین این دو شبیه سازی گزارش می‌شود.

۲. روش کار

روش شبیه سازی مستقیم مونت کارلو اولین بار توسط برد^۱ [۳] ارائه شد. این روش برای مدل سازی جریان‌های گاز رقیق می‌باشد و بر اساس شبیه سازی مستقیم فیزیکی عمل می‌کند. در این روش برخورد بین مولکولی و حرکت مولکول‌ها در یک بازه زمانی از هم جدا شده بطوریکه این بازه زمانی باید کوچکتر از متوسط زمان برخورد مولکول‌ها باشد. سرعت، مختصات مکانی و انرژی درونی هر یک از مولکول‌ها در کامپیوتر ذخیره می‌شود و با حرکت مولکول‌ها در طی زمان عوض می‌شود. در این روش تعداد زیادی از مولکول‌های مدل به منظور شبیه سازی مولکول‌های واقعی بکار می‌روند که تعداد آن‌ها به مراتب کمتر از مولکول‌های واقعی است. بنابراین هر مولکول مدل، بیانگر تعداد زیادی از مولکول‌های واقعی است. دامنه محاسباتی به تعداد زیادی شبکه و زیر شبکه تقسیم

^۱ G.A. Bird

می‌شود. برای انجام محاسبات برخورد در زیر شبکه از روش NTC^1 معرفی شده توسط برد استفاده شده است [۳]. احتمال برخورد بین دو مولکول شبیه سازی شده در یک بازه زمانی برابر است با:

$$P = F_n \sigma_T C_r \Delta t / V_c \quad (0-1)$$

F_n بیانگر تعداد مولکول‌های واقعی که توسط یک مولکول مدل جانشین شده است، V_c حجم شبکه، σ_T سطح مقطع برخورد کل که تابعی از سرعت نسبی بین دو مولکول می‌باشد، C_r سرعت نسبی بین دو مولکول می‌باشد. حداکثر احتمال برخورد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{max} = F_n (\sigma_T C_r)_{max} \Delta t / V_c \quad (0-2)$$

nV_c بیانگر متوسط تعداد مولکول‌های واقعی در هر شبکه است. بنابراین متوسط تعداد مولکول‌های شبیه سازی شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N = nV_c / F_n \quad (0-3)$$

n چگالی عددی گاز واقعی می‌باشد. در روش DSMC تعداد حداکثر جفت‌های انتخاب شده در یک بازه زمانی برابر است با:

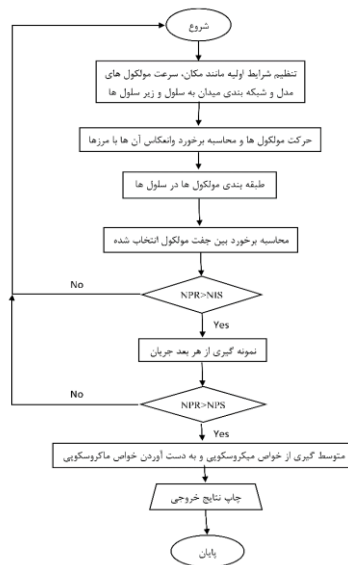
$$0.5 \bar{N} N F_n (\sigma_T C_r)_{max} \Delta t / V_c \quad (0-4)$$

\bar{N} بیانگر متوسط مقدار N می‌باشد. انتخاب جفت مولکول برخورد کننده با احتمال زیر صورت می‌گیرد:

$$\sigma_T C_r / (\sigma_T C_r)_{max} \quad (0-5)$$

از میان حداکثر جفت‌های ممکن تنها جفتی انتخاب می‌شود که نسبت بالا برای این جفت بزرگتر از عدد تصادفی R_f انتخاب شده باشد. الگوریتم استفاده شده برای روش DSMC، در شکل زیر آورده شده است. همانطوری که در شکل می‌توان مشاهده کرد این روش شامل مراحل انتخاب شرایط اولیه، حرکت دادن ذرات، برخورد ذرات با یکدیگر و با سطوح، نمونه گیری و استخراج کمیت‌های ماکروسکوپی می‌باشد.

¹ Non time counter



شکل ۱. الگوریتم روش DSMC

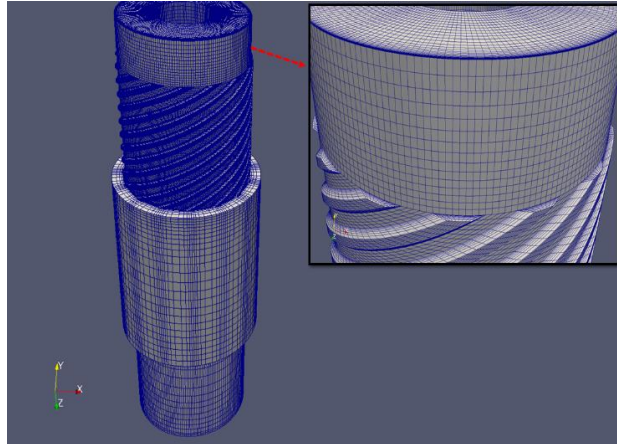
۳. نتایج

در این قسمت به شبیه سازی فضای کل بین روتور و بدنه با حلگر dsmcFoam یکی از حلگرهای نرم افزار OpenFoam پرداخته شده است. فضای بین روتور و بدنه شامل قطعات پمپ مولکولار، کرش رینگ، دمپر و یاتاقان و روتور درایو می باشد. مهمترین پارامتر خروجی مورد انتظار از این شبیه سازی تعیین مقدار نسبت تراکم پمپ مولکولار تعبیه شده برای این ماشین است. مشخصات هندسی پمپ مولکولار در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۱. پارامترهای هندسی برای پمپ مولکولار شبیه سازی شده

عمق شیار (mm)	لقی (mm)	عرض پایینی شیار (mm)	عرض بالایی شیار (mm)	نوع شیار	طول پمپ (mm)
۵	۱	۷	۱۲	دورنقهای	۱۵۰

جنس گاز مورد شبیه سازی گاز هوا انتخاب شد. طول کل روتور نیز ۶۵۰ میلی متر و قطر آن ۱۲۰ میلی متر و سرعت چرخشی روتور نیز ۶۰۰ متر بر ثانیه انتخاب گردیده است. هندسه و شبکه بندی فضای بین روتور و بدنه ترسیم شده توسط نرم افزار گمبیت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. هندسه ترسیم شده از فضای بین روتور و بدنه توسط نرم افزار گمبیت

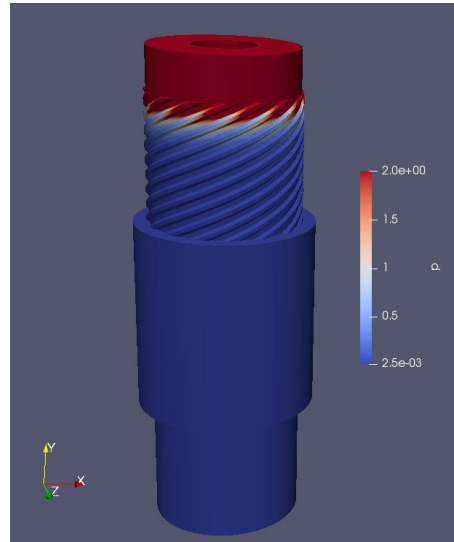
شرایط مرزی مربوط به سطوح چرخان (تمامی سطوح مربوط به روتور و همچنین روتور درایو واقع شده در فضای پایین ماشین) و سطوح ثابت (بدنه ماشین، کرش رینگ، دمپر و یاتاقان قرار گرفته در فضای تاپ اند ماشین) در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. نوع شرایط مرزی و مقداردهی سرعت و دمایی برای هر یک

سطح	نوع شرط مرزی	سرعت چرخشی	دما
بدنه ماشین	انتشاری	۰	۲۹۳
دمپر و یاتاقان	انتشاری	۰	<i>ZeroGradient</i>
کرش رینگ	انتشاری	۰	۳۰۰
کپ بالای روتور	انتشاری	۶۰۰	۳۲۰
کپ پایین روتور	انتشاری	۶۰۰	۳۰۰
دیواره روتور	انتشاری	۶۰۰	۳۱۰

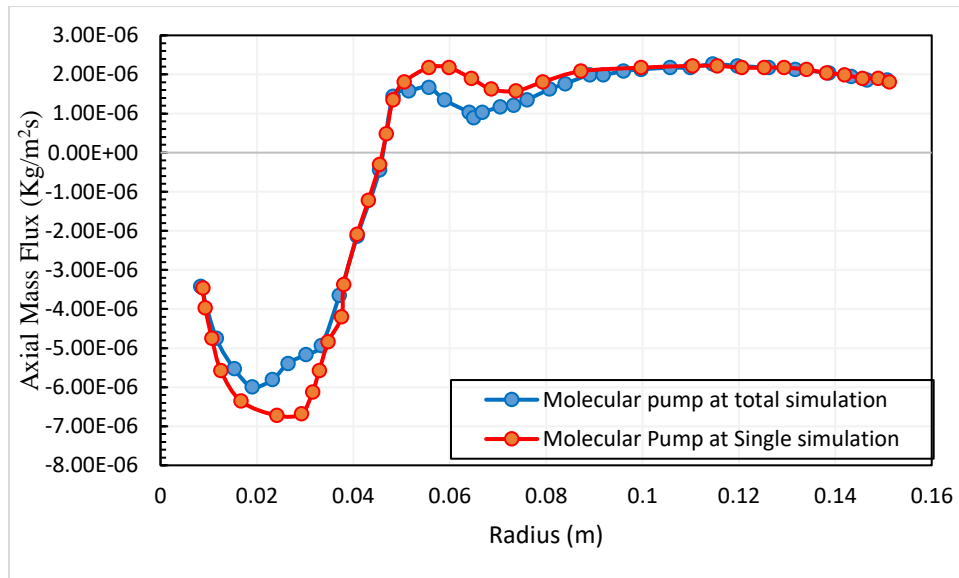
شرط مرزی *ZeroGradient* شرط مرزی است که برای محاسبه مقدار پارامتر مورد نظر برای آن سطح بر اساس شرایط مرزی سایر سطوح در حلگر *dsmcFoam* مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با شبیه سازی هندسه مورد نظر، ذرات با برخوردشان به سطح چرخان روتور و قرارگیری آنها در فضای روبروی پمپ مولکولار با مرور زمان از فضای بین روتور و بدنه به سمت بالای پمپ هدایت می‌شوند و پس از به پایداری رسیدن جریان، فشار در فضای بالای پمپ افزایش و فشار در فضای پایینی پمپ کاهش پیدا می‌کند. شکل ۳ تغییرات فشاری شکل گرفته در فضای کل بین روتور و بدنه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. کانتور تغییرات فشاری شکل گرفته در فضای بین روتور و بدنه ماشین

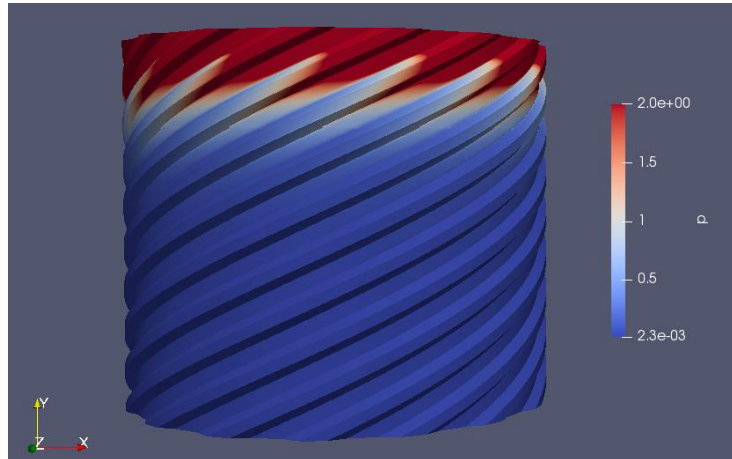
با استفاده از نتایج به دست آمده، مقدار نسبت تراکم پمپ مولکولار برابر با ۸۰۰ به دست می آید. جریان درون پمپ مولکولار به دلیل برخورد ذرات با سطح چرخان روتور در فضای درون شیپار به سمت بالا و همچنین به دلیل ایجاد اختلاف فشار بین قسمت فوقانی و تحتانی پمپ از درون فضای لقی بین روتور و پمپ به سمت پایین پمپ حرکت می کند. در نتیجه شار جرمی شکل گرفته در فضای بین روتور و عمق شیپار به صورت شکل ۴ است.



شکل ۴. شار جرمی محوری شکل گرفته درون پمپ مولکولار در دو حالت شبیه سازی کامل و منفرد

در ادامه کار، به شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد با اعمال شرایط مرزی نرخ جریان جرمی برای ورودی و خروجی آن پرداخته شده است. همانطوری که در شکل ۴ مشاهده می شود مقدار اختلاف در شار جرمی محوری شکل گرفته در هر دو حالت شبیه سازی کامل و منفرد پمپ مولکولار ناچیز می باشد. به دلیل اینکه هیچ گونه نشتی برای شبیه سازی فضای کل بین روتور و بدنه در نظر گرفته

نشده است، در نتیجه مقدار نشتی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد نیز برابر با صفر در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ نیز کانتور تغییرات فشاری به دست آمده از شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد با اعمال شرایط مرزی برای ورودی و خروجی آن نشان داده شده است که مشاهده می شود مقدار نسبت تراکم در این روش حدود ۸۶۹ خواهد شد.



شکل ۵. کانتور تغییرات فشاری شکل گرفته درون پمپ مولکولار منفرد

با مقایسه نسبت تراکم ایجاد شده از شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد با اعمال شرایط مرزی ورودی و خروجی برای آن با نتایج شبیه سازی پمپ مولکولار واقع شده در کل فضای بین روتور و بدنه مشاهده شد که بین نسبت تراکم به دست آمده از دو شبیه سازی حدود ۸ درصد اختلاف وجود دارد که این مقدار اختلاف را می توان ناشی از خطای استفاده از شرط مرزی در حالت شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد دانست.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله به شبیه سازی کل فضای بین روتور و بدنه یک ماشین سانتریفیوژ فرضی بدون در نظر گرفتن نشتی های اتصالات ثابت و دوار برای آن با روش DSMC پرداخته شد. هدف از این شبیه سازی استخراج مقدار نسبت تراکم پمپ مولکولار به عنوان یکی از مهمترین قطعات واقع شده در فضای بین روتور و بدنه می باشد. پس از شبیه سازی کل فضای بین روتور و بدنه مشاهده شد که مقدار نسبت تراکم پمپ مولکولار برای یک گاز هوای خالص برابر با ۸۰۰ تعیین شد که در شبیه سازی این پمپ مولکولار به صورت مجزا یا منفرد با شرایط کاملا یکسان، مقدار این نسبت تراکم برابر با ۸۶۹ تعیین شد که این حدود ۸ درصد اختلاف بین نتایج را می توان ناشی از استفاده از شرط مرزی های ورودی و خروجی برای پمپ مولکولار منفرد دانست. همچنین نتایج مربوط به شار جرمی محوری شکل گرفته درون یک شیار از پمپ مولکولار در دو حالت با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به بالا بودن حجم محاسباتی مربوط به شبیه سازی کل فضای بین روتور و بدنه جهت استخراج نسبت تراکم پمپ مولکولار و با توجه به ناچیز بودن اختلاف بین نتایج نسبت تراکم و شار جرمی محوری پمپ مولکولار در دو حالت شبیه سازی، می توان با پذیرش ۸ درصد اختلاف بین نتایج این دو شبیه سازی، به شبیه سازی پمپ مولکولار منفرد جهت تعیین مقدار نسبت تراکم یک پمپ مولکولار پرداخت.



۵. مراجع

- [1] T. S. W. Sawada, "Pumping mechanism of helical grooved molecular drag pumps", *Journal of vacuum science & technology*, 17(4), 2069-2074, 2000.
- [2] E.N. Sickafus, R.B. Nelson, R.A. Lowry, "The holweck type molecular pump" university of virginia, Report No. EP-4422-178-61U, August 1961.
- [3] G. Bird, *The DSMC method*, The University of Sydney, 2013.
- [4] R. P. and D. F., "Direct Monte Carlo simulation in a gas centrifuge," *InAIP Conference Proceedings*, pp. 169-173, 2001.
- [5] S . Yousefi-Nasab, J. Safdari, J. Karimi-Sabet, Prediction of the compression ratio of a Holweck-type molecular pump with the presence of multi-component gases using a modified Sickafus method for high-speed rotors, *journal of vacuum*, 109056, 2020.