



شبیه سازی پمپ مولکولار با اعمال توزیع محوری و شعاعی سرعت چرخشی گاز درون شیار

یوسفی نسب، صادق*^(۱) - صفدری، سید جابر^(۱) - کریمی ثابت، جواد^(۱) - ملاح، محمد حسن^(۱) - امینی، الهام^(۲) -

خواجه نوری، مسعود^(۲) - قربانپور، علی اصغر^(۱)

^۱سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

^۲سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری های پیشرفته ایران

چکیده

پمپ مولکولار در ماشین سانتریفیوژ گازی، نقش بسیار مهمی در کاهش نرخ کار انجام شده بر روی گاز و در نتیجه کاهش دمای قطعات حساس ماشین دارد. با توجه به این که نسبت تراکم ایجاد شده توسط پمپ مولکولار کاملاً وابسته به مشخصات هندسی آن می‌باشد، در نتیجه شبیه‌سازی دقیق رفتار گاز درون آن، ابزاری مفید جهت طراحی پمپ برای طراحی ماشین‌های جدید می‌باشد. یکی از روش‌های شبیه‌سازی، حل تحلیلی معادلات حاکم با روش سیکافوس است. در این مقاله اثر توزیع محوری و شعاعی برای سرعت چرخشی گاز درون شیار توسط شبیه‌سازی مولکولی DSMC برای پمپ مولکولار پیش بینی گردیده و اثر ضریب لغزشی سرعت حاصله از آن در معادلات مرتبط با حل تحلیلی روش سیکافوس لحاظ گردیده است.

کلمات کلیدی: مولکولار پمپ، DSMC، سیکافوس، ضریب لغزشی سرعت

مقدمه

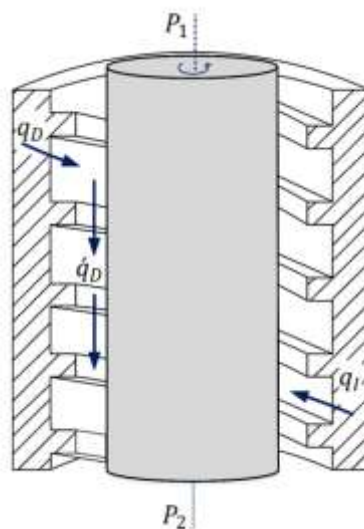
پمپ مولکولار در قسمت بالای ماشین سانتریفیوژ و بین فضای روتور و بدنه نصب می‌شود و با تخلیه گازهای آن، موجب کاهش نیروی درگ روی پوسته خارجی روتور می‌شود که در نتیجه آن، توان مصرفی ماشین کاهش می‌یابد. حفظ خلأ اطراف روتور به منظور تعادل برای چرخش و عدم واکنش گاز با روغن یا تاقان نیز می‌تواند مورد توجه باشد. با توجه به تاثیر مستقیم توان اصطکاکی بر افزایش هزینه برق مصرفی و همچنین دمای قطعات روتور که می‌تواند یکی از مهمترین عوامل کرش ماشین باشد، به دست آوردن یک مقدار نسبت تراکم مناسب می‌تواند در محاسبات مربوط به توان اتلافی فضای بیرونی روتور بسیار حائز اهمیت باشد. به این منظور ساوادا در سال ۲۰۰۰ [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. فضای درون ماشین سانتریفیوژ به دو قسمت درون و بیرون روتور تقسیم بندی

می شود. تعیین پروفایل تغییرات محوری و شعاعی سرعت چرخشی با استفاده از روش DSMC و سپس اعمال آن به صورت یک ضریب در روش بیان شده توسط سیکافوس از اهداف اصلی این مقاله می باشد.

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. همانطوری که در این مقاله ذکر شده است، نتایج آن در سرعت های 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 می باشد. به همین دلیل در این مقاله با استفاده از نتایج شبیه سازی مولکولی پمپ با روش DSMC [۳، ۴]، مقدار ضریب لغزشی مورد استفاده در معادلات سیکافوس اصلاح می گردد [۵، ۶].

روش انجام کار

سیکافوس و همکارانش [۲] جریان ناشی از حرکت دیواره روتور در فضای مقابل شیار را با q_I ، جریان ناشی از گرادیان فشار در شیارها را با q_D و جریان ناشی از لقی بین روتور و شیارها را با $q_{D'}$ تعریف کردند. در واقع دبی عبوری از درون شیار حاصل جمع سه دبی مذکور خواهد بود. در شکل (۱) شماتیکی از جریان های شکل گرفته درون شیار پمپ مولکولار نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از جریان های شکل گرفته درون شیار



بر اساس روابط سیکافوس مقدار نسبت فشار بالای پمپ مولکولار به پایین پمپ توسط رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد [2]:

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{3 S \eta L \cos\theta}{(1 + \epsilon) 4 A} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{h^2 \pi D C L}{2 A^2 n w}$$

که

$$\eta = \frac{V_w}{v_0} = \frac{V_w}{2 \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}}} \quad (2)$$

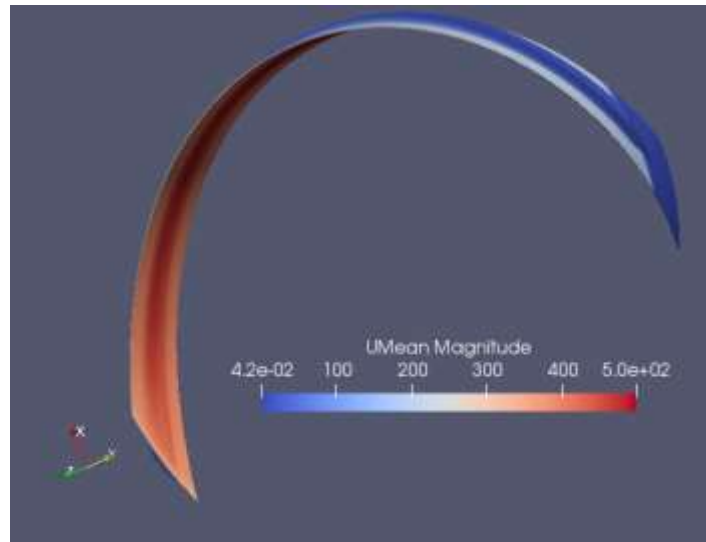
در رابطه فوق V_w سرعت محیطی روتور، M جرم مولکولی گاز، D قطر روتور، A سطح مقطع و C محیط شیار می‌باشد. رابطه فوق در صورتی که سرعت محیطی روتور کمتر یا مساوی میانگین سرعت جنبشی مولکول‌های گاز باشد دارای اعتبار می‌باشد ($\eta \leq 1$). در این رابطه از سرعت چرخشی روتور برای سرعت چرخشی گاز درون شیار استفاده می‌گردد. به همین دلیل در صورتی که سرعت شیار از میانگین سرعت مولکولی بیشتر گردد، نتایج از مقادیر واقعی دچار انحراف می‌گردند. به همین دلیل می‌توان با شبیه سازی مولکولی همچون روش شبیه سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) مقدار سرعت مولکول‌های گاز بعد از برخورد با روتور و قرارگیری آن‌ها درون شیار را تعیین کرد. در نتیجه با تعریف ضریب لغزش D_V در روابط بالا، می‌توان رابطه زیر را برای η پیشنهاد کرد:

$$\eta = \frac{V_w}{v_0} = \frac{D_V V_w}{2 \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}}} \quad (3)$$

نتایج

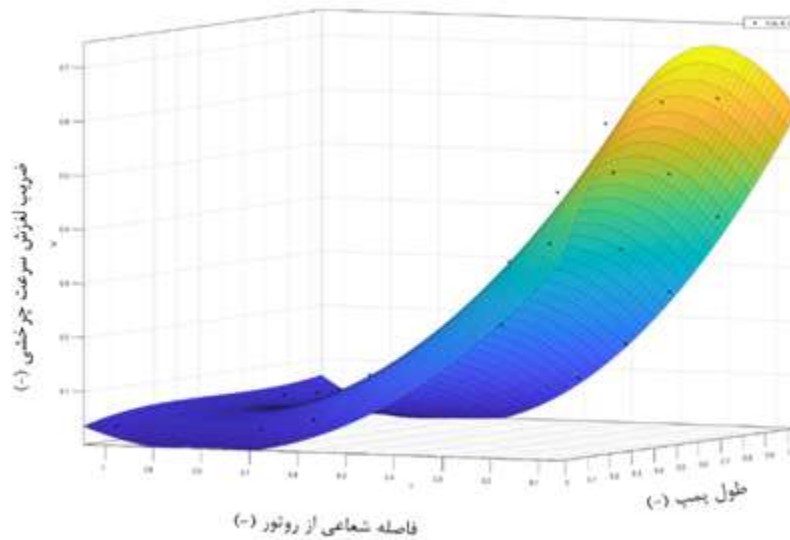
در ابتدا برای تعیین ضریب لغزشی D_V مورد استفاده در رابطه (۳)، به شبیه سازی یک شیار از پمپ مولکولار با روش DSMC پرداخته شده است. نرم‌افزار مورد استفاده برای این شبیه سازی، نرم‌افزار OpenFOAM و حلگر dsmcFoam

می‌باشد. در مدل انتخاب شده با استفاده از شرط مرزی دوره‌ای، به شبیه‌سازی رفتار گاز هوا درون یک شیار با سطح مقطع مستطیلی پرداخته شده است. در شکل (۲) کانتور سرعت چرخشی درون شیار نشان داده شده است.



شکل ۲. سرعت چرخشی شکل گرفته درون شیار

بر اساس نتایج شبیه‌سازی با حلگر dsmcFoam، تغییرات شعاعی و محوری سرعت چرخشی درون شیار به صورت شکل (۳) قابل استخراج می‌باشد:



شکل ۳. تغییرات شعاعی و محوری سرعت چرخشی

با توجه به شکل (۳) رابطه ضریب لغزشی برای پمپ مولکولار ماشین‌های سانتریفیوژ با هندسه مستطیلی شکل و برای تمامی سرعت‌های روتور پیشنهاد می‌گردد:

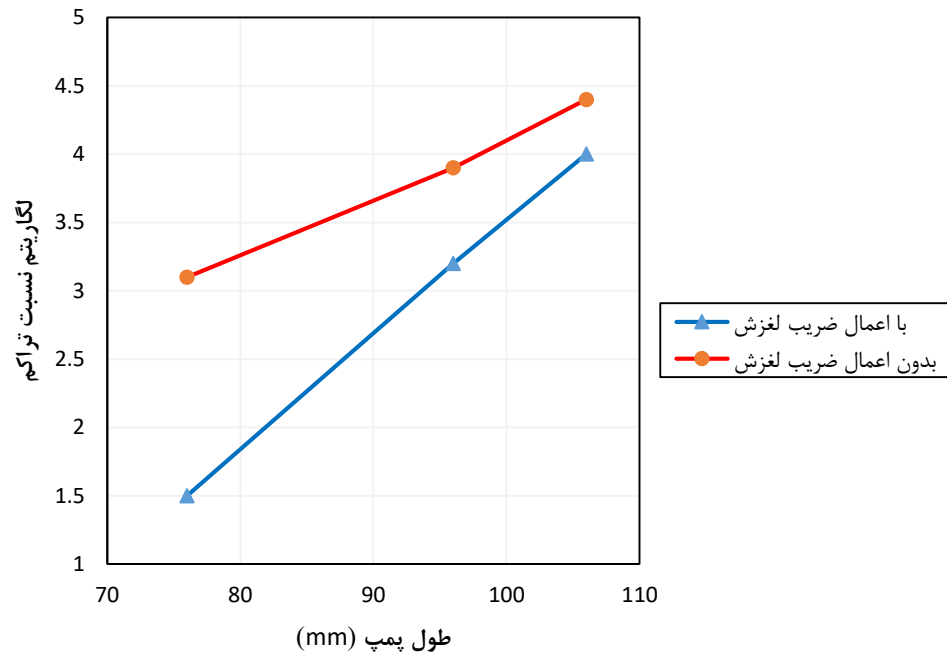
$$D_v = (a_1 V_W + a_2)(a_3 + a_4 K + a_5 r + a_6 K^2 + a_7 K r + a_8 r^2 + a_9 K^3 + a_{10} K^2 r + a_{11} r^2 K) \quad (4)$$

که

$$a_1 = -0.001614, a_2 = 2.13, a_3 = 0.4524, a_4 = 1.222, a_5 = -1.121, a_6 = -0.7921$$

$$a_7 = -1.754, a_8 = 0.7154, a_9 = -0.329, a_{10} = 1.307, a_{11} = 0.3511$$

رابطه پیشنهاد شده برای ضریب لغزشی فوق دارای توزیع محوری و شعاعی برای سرعت چرخشی گاز درون روتور می‌باشد که این امر موجب افزایش دقت این روش نسبت به حالت بدون اعمال ضریب لغزش برای گاز درون شیار می‌گردد. بر اساس رابطه پیشنهاد شده برای ضریب لغزشی، برای پمپ‌های مولکولار با طول‌های ۹۶، ۷۹ و ۱۰۶ میلی‌متر شبیه‌سازی با روش سیکافوس صورت گرفته است و نتایج آن در شکل زیر آورده شده است. در این شبیه‌سازی سرعت چرخشی روتور برابر با ۳۱۴ متر بر ثانیه، قطر پمپ مولکولار ۱۰۰ میلی‌متر، عرض شیار ۳/۵ میلی‌متر، عمق شیار ۳ میلی‌متر و تعداد شیار برابر با ۲۴ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. لگاریتم نسبت تراکم برای طول‌های مختلف پمپ مولکولار برای گاز هوا



با مقایسه نتایج به دست آمده در شکل (۴) می‌توان مشاهده کرد که در صورت لحاظ نکردن اثر ضریب لغزش سرعت، مقدار لگاریتم نسبت تراکم ایجاد شده توسط پمپ مولکولار تا ۹۶ درصد می‌تواند دچار انحراف گردد.

نتیجه گیری

جریان درون شیار پمپ مولکولار از سه نوع جریان تشکیل می‌شود. جریان درون شیار و لقی پمپ مولکولار به دلیل اختلاف فشار بین بالا و پایین پمپ ایجاد می‌گردد. جریان مخالف با این دو جریان به دلیل برخورد مولکول‌های گاز با دیواره روتور و در نتیجه حرکت به سمت قسمت بالایی پمپ مولکولار ایجاد می‌گردد. در روش سیکافوس از مقدار سرعت چرخشی روتور برای سرعت چرخشی گاز درون شیار استفاده گردیده است که این موجب ایجاد انحراف نتایج از مقادیر واقعی می‌گردد. با توجه به اعمال ضریب لغزشی سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی یک شیار از پمپ مولکولار با هندسه مستطیلی شکل و با حلگر dsmcFoam، تابع مناسب برای ضریب لغزشی سرعت پیشنهاد گردید که بر اساس اعمال این ضریب لغزش در معادلات سیکافوس، موجب کاهش انحراف از مقادیر واقعی تا میزان ۹۶ درصد گردید.

مراجع

- [1] Sawada, T. S. W., "Pumping mechanism of helical grooved molecular drag pumps," *Journal of vacuum science & technology*, vol. 17, no. 4, pp. 2069-2074, 2000.
- [2] Sikafus, E.N., Nelson, R.B., and Lowry, R.A., "The holweck type molecular pump", *University of Virginia, Report No. EP-4422-178-61U*, pp.1-32, 1961.
- [3] Bird, G. A., "Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows," Clarendon, Oxford, pp.2-45, 199-207, 218-256, 1994.
- [4] Bird, G. A., "The DSMC method," *The University of Sydney*, pp.208-211, 2013.
- [5] www.OpenFOAM.org.
- [6] White, C. "Adaptive Mesh Refinement for an Open Source DSMC Solver," *International Space Planes and Hypersonic System and Technology*, pp.2-8, 2015.