



مدلسازی پمپ مولکولی یک سانتریفیوژ گازی با شیار ذوزنقه ای با روش تحلیلی

خواجه نوری، مسعود*^(۱و۲)-یوسفی نسب، صادق^(۲)- شادمان، محمد مهدی^(۲)-صفدری، سید جابر^(۳)-
امینی، الهام^(۲)

(۱) دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان

(۲) شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی، تهران

(۳) پژوهشکده مواد و چرخه سوخت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران

چکیده:

حفظ خلأ در فضای بین روتور و بدنه، در حین فرایند گازدهی و غنی سازی حائز اهمیت است. به همین دلیل قطعه‌ای به نام پمپ مولکولی روی قسمت بالایی بدنه متصل می‌شود. این قطعه ثابت، دارای شیارهایی است که وقتی ذرات در حال حرکت با آن برخورد می‌کنند با توجه به جهت شیارها، به صورتی منحرف می‌شوند که مجدداً به درون روتور برمی‌گردند. در این مقاله در ابتدا مقدمه‌ای از انواع پمپ‌های خلأ ارائه شده است. سپس توزیع فشار در طول پمپ مولکولی با روش تحلیلی ارائه شده است. سپس با جمع جبری سه عامل مؤثر در ایجاد جریان در پمپ مولکولی رابطه تغییرات فشار در پمپ مولکولی برای شیار ذوزنقه‌ای استخراج شده است.

کلید واژه‌ها: پمپ مولکولی، شیار ذوزنقه ای، روش تحلیلی

Molecular Pump Modelling of a Gas Centrifuge with a Trapezoidal Notch by Analytical Method

Masoud Khajenoori^{*(1,2)}, Sadegh Yousefi nasab², Mohammad Mehdi Shadman², Seyed Jabber Safdari³,
Elham Amini²

¹ Faculty of chemical, Gas and Petroleum Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

² Atomic Energy Organization of Iran, Iran Advanced Technologies Company

³ Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Material and Nuclear Fuel Research School

Abstract:

Vacuum maintaining in the space between the rotor and casing during the gas-feeding and enrichment process is of great importance. Therefore, a piece named molecular pump is attached on the top side of the casing. This fixed piece has some notches in which at the time of collision with the moving particles, regarding the notches directions, the deviation would happen in the manner that they would be returned to the rotor again.



In the present paper, at first, an introduction of different vacuum pumps has been presented. Then, the pressure distribution along the molecular pump has been presented using the analytical method. Afterwards, through mathematical summation of three influential factors on the creation of flow in the molecular pump, it has been extracted the pressure changes relation in the molecular pump for the trapezoidal notch profile.

Keywords: Molecular pump, Trapezoidal notch, Analytical method

۱- مقدمه :

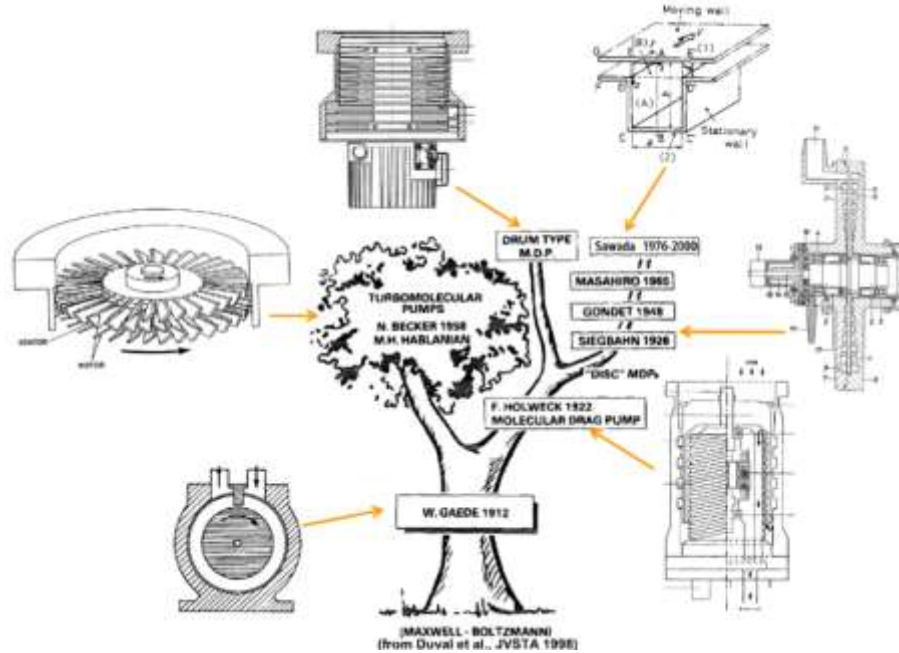
پمپ مولکولی تجهیزاتی دو سر باز مشتمل بر دو سیلندر هم محور یکی ثابت و دیگری متحرک است. در اثر چرخش عضو متحرک و وجود شیارهای مارپیچ روی جدار داخلی سیلندر ثابت، مولکول های گاز که دارای سرعت حرارتی می باشند با برخورد به سطح متحرک مؤلفه سرعتی در جهت چرخش سیلندر متحرک در شیارها به خود می گیرند. این سطح متحرک باید از نظر مکانیکی تا حد امکان به قسمت ثابت نزدیک باشد تا نشت گاز به حداقل برسد. ایده پمپ مولکولی، اولین بار توسط جانده در سال ۱۹۱۲ مطرح و توسعه یافت که شامل یک استوانه دوار با سرعت بالا درون یک محفظه ثابت بود [۱]. جانده علاوه بر ساخت پمپ مولکولی، یک تحلیل تئوری تقریبی از پمپ مولکولی نیز ارائه نمود. او نواحی مولکولی و ویسکوز را در یک معادله ترکیب نموده و با استفاده از پدیده لغزش، این دو ناحیه را مدل نمود. مرسیریر با تکمیل روابط پیشنهادی جانده، فرض نمود که جریان خالص گاز از یک سمت مقطع پمپ به سمت دیگر شامل سه نوع جریان شامل: (الف) جریان درون شیار ناشی از سطح متحرک روتور، (ب) جریان دیفیوژن برگشتی درون شیار در اثر گرادیان فشار و (ج) جریان دیفیوژن بین شیارها از میان فاصله بین روتور و خان های پمپ متمایز است [۲ و ۱]. ساوادا از ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰ با ساده سازی معادلات ناویر استوکس به حل عددی این معادلات در ناحیه پیوسته و همچنین معادله حاکم بر رژیم جریان مولکولی پرداخت و معادله سرعت را به ازای عدد نادسن $0.1/0$ تا ۱۰۰ ترسیم نمود [۳-۴]. نمودار درختی توسعه پمپ مولکولی تا سال ۲۰۰۰ در شکل زیر ترسیم شده است.

^۱W. Gaede

^۲L. Maurice

^۳T. Sawada

^۴Knudsen number



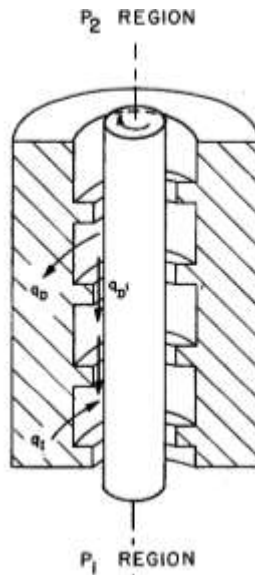
شکل ۱. تاریخچه درختی پمپ مولکولی

روش‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی پمپ مولکولی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش تحلیلی حل معادلات جریان با روش سیکافوس و همکارانش است که با توجه به کاهش زمان محاسبات، بسیار مفید خواهد بود [۵]. در این پژوهش سه عامل تأثیرگذار در ایجاد جریان در یک شیار پمپ مولکولی در نظر گرفته شده است. مجموع سه جریان ناشی از "حرکت صفحات روتور در مقابل شیارها، گرادیان فشار در شیارها و لقی بین روتور و شیارها" را به عنوان جریان درون یک شیار پمپ مولکولی در نظر گرفته شده است. در این مقاله با روش تحلیلی، تغییرات فشار در طول شیار پمپ مولکولی یک سانتیفریوژ فرضی برای سطح مقطع دوزنقه‌ای مدلسازی شده است. در نهایت نمودار عملکرد پمپ مولکولی ارائه شده است.



۲- تئوری روش

جریان ناشی از حرکت صفحات روتور در 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. این جریان ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک جریان های مفروض در پمپ مولکولی

دبی جرمی جریانی که به علت حرکت سطح روتور (A) در واحد عرض شیار ایجاد می شود با رابطه زیر بیان شده است:

$$q_I = \rho \bar{v} A \left(\frac{gr}{\text{sec}} \right) \quad (1)$$

در اینجا \bar{v} متوسط سرعت رانش مولکول های گاز در اثر حرکت روتور در جهت طول شیار است. از طرفی اگر رفتار گاز ایده آل فرض گردد، دبی جرمی بر واحد عرض شیار تحت تاثیر گرادیان فشار به صورت زیر تعیین شده است:

$$q_D = -\frac{8}{3} \sqrt{\frac{2M}{\pi RT}} \frac{A^2}{C} \frac{dP}{dl} \quad (2)$$



در اینجا A مساحت شیپار، C محیط شیپار، M وزن مولکولی گاز، T دما، R ثابت جهانی گازها، P فشار و l طول اندازه گیری شده از شیپار در جهت افزایش فشار است. عاملی که باعث حرکت جریان در فضای بین شیپارها می‌شود، جریان نفوذی محوری ($q_{D'}$) می‌باشد که در فضای بین روتور و پمپ مولکولی ایجاد شده است. به عبارت دیگر، با فرض اینکه تئوری نادسن در اینجا نیز صادق باشد دبی جرمی ناشی از جریان نفوذی به صورت کسری از دبی جرمی ناشی از گرادیان فشار به صورت زیر تعریف شده است.

$$q_{D'} = \epsilon q_D \quad (3)$$

همچنین ϵ به صورت زیر محاسبه شده است.

$$\epsilon = \frac{q_{D'}}{q_D} = \frac{\frac{A'^2 dP'}{C' dl'}}{\frac{A^2 dP}{C dl}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، l طول شیپارها در جهت محور عمود و l' فاصله بین دو شیپارها در جهت عمود است. از آنجایی که این دو جریان بین اختلاف فشار کل یکسانی صورت می‌گیرد بنابراین روابط زیر حاکم می‌باشد.

$$\begin{aligned} A' &= h\pi D \\ C' &= 2\pi D \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه فوق h مقدار لقی (فاصله بین روتور و پمپ) و D قطر روتور، A' مساحت کل بین دو شیپار و C' محیط بین دو شیپار می‌باشد که به ترتیب با رابطه زیر بیان می‌گردد.

$$\epsilon = \frac{A'^2 CL}{A^2 C' L'} \quad (6)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۶) رابطه (۷) حاصل شده است.

$$\epsilon = \frac{h^2 \pi D C L}{A^2 2 L'} \quad (7)$$

در رابطه (۷) L' فضای بین شیپارها در طول عمودی پمپ می‌باشد که برابر با nw است. n تعداد کل دور (پیچش) یک شیپار و w فاصله بین دو شیپار می‌باشد. دبی جرمی خالص داخل پمپ مولکولی، جمع جبری جریان های q_i ، q_D و $q_{D'}$ می‌باشد. بنابراین:



$$Q = q_I + q_D + q_{D'} = q_I + (1 + \epsilon)q_D = \frac{M}{RT} \bar{v} AP - (1 + \epsilon) \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2M}{\pi RT}} \frac{A^2}{C} \frac{dP}{dl} \quad (8)$$

در رابطه فوق رفتار گاز، ایده‌آل فرض شده است. برای ساده سازی رابطه (۸) ضرایب زیر تعریف شده است.

$$\alpha = \bar{v} A \frac{M}{RT}$$

$$\beta = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2M}{\pi RT}} \frac{A^2}{C} \quad (9)$$

برای برقراری بقای جرم می‌بایست Q مستقل از l باشد. اگر شیار یکنواخت باشد α و β ثابت خواهند بود. با بازنویسی رابطه (۸)، رابطه مناسب برای محاسبه نسبت فشار بالا و پایین پمپ مولکولی برای g شیار با سطح مقطع دوزنقه حاصل شده است.

$$\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{ult} = \frac{b}{\frac{1}{2} \lambda L \cos \theta + \frac{h^2 \pi D (\sqrt{4d^2 + (\lambda d - a)^2} + \lambda d + a)}{(\lambda d + a) d^2 \lambda k g \left(1 - \frac{g \lambda d}{\pi D \sin \theta} \right) \cos \theta}} \quad (10)$$

فشار در پایین پمپ به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$P_2 = P_1 \exp \left[\frac{b}{\frac{1}{2} \lambda L \cos \theta + \frac{h^2 \pi D (\sqrt{4d^2 + (\lambda d - a)^2} + \lambda d + a)}{(\lambda d + a) d^2 \lambda k g \left(1 - \frac{g \lambda d}{\pi D \sin \theta} \right) \cos \theta}} \right] \quad (11)$$

رابطه مناسب برای محاسبه دبی جرمی در طول پمپ مولکولی به صورت رابطه زیر حاصل شده است.

$$Q \text{ (mass flow)} = \frac{P_1 \alpha g \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{ult} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right)}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{ult} - 1} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{s(a+s)d}{2(\sqrt{4d^2 + (\lambda d - a)^2} + \lambda d + a)} \frac{M}{RT} N \pi D \cos \theta$$

در رابطه (۱۲)، N دور روتور بر حسب rps می‌باشد.

۳- نتایج:

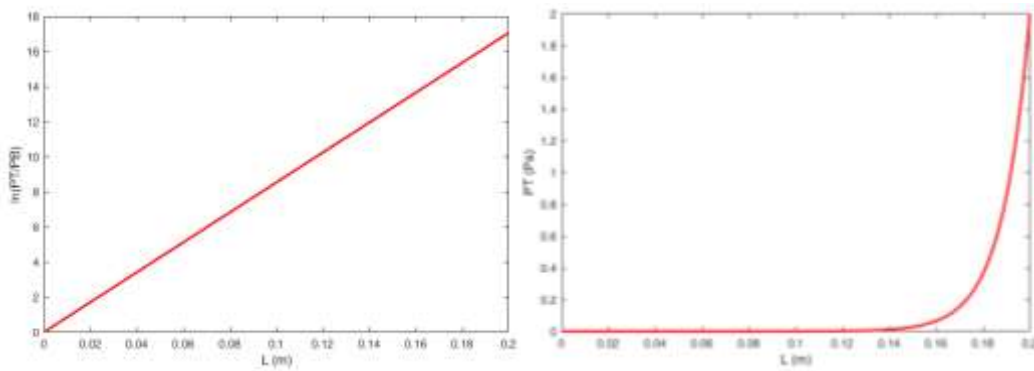


جهت صحت سنجی، نتایج با پمپ مولکولی نوع اول در مرجع [۵] مورد مقایسه قرار گرفته شده است. با توجه به پارامترهای هندسی و عملیاتی موجود در جدول زیر مقادیر نسبت فشار محاسباتی برای شیار مستطیلی با مقدار مرجع توافق بسیار خوبی داشت.

جدول ۱. صحنه گذاری پمپ مولکولی [۵]

در صد خطای کد نسبت به مقدار مرجع (%)	$\ln(p_2/p_1)$	تعداد شیار	زاویه شیار	فاصله لقی (mm)	عمق شیار (m)	نتایج
۴/۳۱۶۰	۵/۹۸۰۲	۲/۴۵۵۰	۱۹/۵۸۹۲	۱/۲۷۰۰	۰/۰۰۷۳	کد محاسباتی
	۶/۲۵۰۰	۲/۱۴۰۰	۱۴/۱۵۰۰	۱/۲۷۰۰	۰/۰۰۵۸	سیکافوس

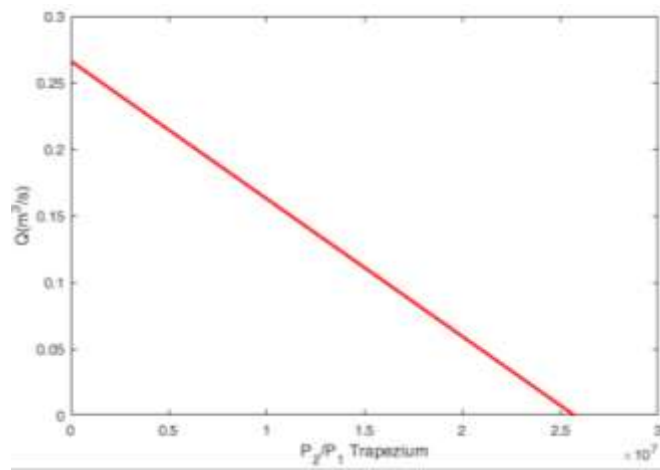
پمپ مولکولی با طول 20 cm ، دمای 320 K ، تعداد شیار 12 ، عمق شیار 10 mm ، زاویه شیار با محور افقی 29 درجه، سرعت روتور 650 m/s ، گاز هوا با وزن مولکولی 29 gr/mol ، فشار بالای پمپ 2 pa ، مقدار لقی 2 mm ، قطر روتور 25 cm ، عرض بالای شیار 15 mm و عرض پایین شیار 8 mm در نظر بگیرید. شکل زیر توزیع فشار در طول پمپ مولکولی با روش تحلیلی را برای پمپ مولکولی با مشخصات فوق نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) فشار در پایین پمپ مولکولی تا بالای آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد به صورتی که بیشترین مقدار تغییرات فشار در قسمت بالایی پمپ صورت می‌گیرد. لگاریتم نسبت فشار پمپ مولکولی برابر با $17/063$ محاسبه شده است.



شکل ۳. نتایج فشار و نسبت فشار در طول پمپ مولکولی



عملکرد پمپ مولکولی در شکل زیر نشان داده شده است. این نمودار نسبت فشار در بالا و پایین پمپ بر حسب دبی جرمی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد با کاهش دبی، نسبت فشار بالا به پایین پمپ مولکولی افزایش می‌یابد.



شکل ۴. نسبت فشار بالا و پایین پمپ مولکولی بر حسب دبی جرمی

۴- بحث و نتیجه گیری

با توجه به رابطه استخراج شده با روش تحلیلی، عملکرد پمپ مولکولی به شدت به دبی جرمی گاز مورد شبیه سازی حساس می‌باشد به گونه‌ای که با تغییر در مقدار دبی جرمی گاز، مقدار نسبت فشار در پمپ به صورت خطی تغییر می‌کند. فشار در پایین پمپ مولکولی تا بالای آن بصورت نمایی افزایش می‌یابد به صورتی که بیشترین مقدار تغییرات فشار در قسمت بالایی پمپ صورت می‌گیرد. روش تحلیلی بیشتر برای کاهش حجم محاسبات در مطالعه پارامتریک کاربرد دارد به گونه‌ای که می‌توان محدوده اثر پارامترهای هندسی و عملیاتی را با آن تعیین نمود.

۵- مراجع

[1] W. Gaede, "Die molekularluftpumpe", Annalen der Physik, 346(7), 337-380, 1913.



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۰۱ اسفندماه ۱۳۹۷- دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)



[2] L. Maurice, “The location of the fluid pump in the cornea”, Journal of physiology, 221(1), 43-54, 1972.

[3] T. Sawada, “Rarefied gas flow in a rectangular groove facing a moving wall”, Sci. papers, 70 (4), 79-86, 1976.

[4] T. S. W. Sawada, “Pumping mechanism of helical grooved molecular drag pumps”, Journal of vacuum science & technology, 17(4), 2069-2074, 2000.

[5] 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.