



مدلسازی پمپ مولکولار با شیارهای مختلف با روش تحلیلی سیکافوس

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

خواجه نوری، مسعود^(۳) - حسنونند، محسن^(۱)

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

^۳ شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

چکیده:

حفظ خلأ در فضای بین روتور و بدنه در حین فرایند گازدهی و غنی‌سازی حائز اهمیت است. به همین دلیل قطعه‌ای به نام پمپ مولکولی روی قسمت بالایی بدنه ماشین ساتنریفیوژ 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 باز می‌گردند. در این مقاله با استفاده از روشی مشابه روش ارائه شده توسط سیکافوس و همکارانش، با در نظر گرفتن سه عامل موثر در ایجاد جریان در پمپ، رابطه تعیین توزیع فشار در طول پمپ با هندسه‌های مختلف استخراج شده است و در نهایت نسبت تراکم ایجاد شده توسط هر یک از هندسه‌ها با روش تحلیلی تعیین می‌گردد.

کلمات کلیدی: پمپ مولکولی، سیکافوس، روش تحلیلی، هندسه‌های مختلف

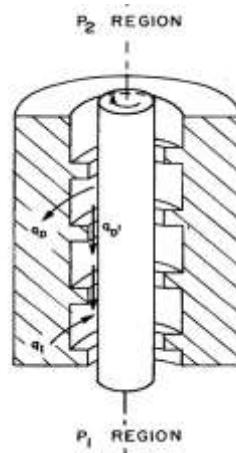
۱- مقدمه

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، مولکول‌های گاز که دارای سرعت حرارتی می‌باشند با برخورد به سطح متحرک درون شیارها مولفه سرعتی در جهت چرخش سیلندر متحرک به خود می‌گیرند. این سطح متحرک باید از نظر مکانیکی تا حد امکان به قسمت ثابت نزدیک باشد تا نشت گاز به حداقل برسد. ایده مولکولی پمپ اولین بار توسط جائده در سال ۱۹۱۲ مطرح و توسعه یافت که شامل یک استوانه دوار با سرعت بالا درون یک محفظه ثابت بود [۱]. جائده 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. مر سیریر با تکمیل روابط پیشنهادی جائده، 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 خان‌های پمپ متمایز می‌باشد

[۲]. 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 تا 100 ترسیم نمود [۳-۴]. روش‌های مختلفی جهت شبیه سازی پمپ مولکولی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش تحلیلی حل معادلات جریان با روش سیکافوس و همکارانش می‌باشد که با توجه به کاهش زمان محاسبات، به عنوان شبیه سازی اولیه بسیار مفید می‌باشد. سیکافوس و همکارانش سه عامل تأثیر گذار در ایجاد جریان در یک شیار پمپ هولویک را در نظر گرفتند. پمپ هولویک پمپی است که گاز از درون شیارهای ثابت به دلیل حرکت روتور چرخان به قسمت انتهایی آن هدایت می‌شوند. آنها جریان درون یک شیار پمپ هولویک را مجموع سه جریان ناشی از "حرکت صفحات روتور در شیارها، گرادیان فشار بین بالا و پایین پمپ و لقی بین روتور و شیارها" در نظر گرفتند. در این مقاله با اصلاح روابط سیکافوس، تغییرات فشار در طول شیار پمپ مولکولی فرضی برای سطح مقطع‌های مختلف مدلسازی شده است.

۲- تئوری روش سیکافوس

سیکافوس و همکارانش [۵] جریان ناشی از حرکت دیواره 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 جریان‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): شماتیک جریان‌های مفروض در پمپ هولویک [۵].

دبی جرمی خالص داخل پمپ مولکولی، جمع جبری جریان‌های q_I ، q_D و $q_{D'}$ می‌باشد [۵]. بنابراین:



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

که

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

در این رابطه M جرم مولکولی، A مساحت شیار، C محیط شیار، R ثابت جهانی گازها، dl طول گسسته شده شیار مارپیچ، D قطر پمپ و h لقی بین پمپ و روتور می‌باشد. برای برقراری بقای جرم می‌بایست Q مستقل از l باشد. با توجه به رابطه (۱)، هر چقدر نسبت سطح به محیط شیار بیشتر باشد مقدار نسبت تراکم ایجاد شده توسط پمپ مولکولار بیشتر خواهد شد. با جایگذاری مساحت و محیط شیار دوزنقه‌ای در رابطه (۱)، رابطه‌ای مناسب برای محاسبه نسبت فشار بالا و پایین پمپ مولکولی برای g شیار و با سطح مقطع دوزنقه به دست می‌آید [۵].


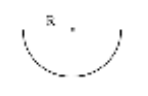
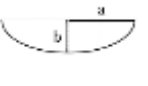
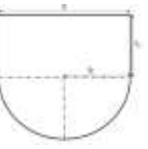
$$\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{ult} = \frac{b}{\frac{1}{2} \frac{\lambda d + a}{\lambda L \cos \theta} + \frac{h^2 \pi D (\sqrt{4d^2 + (\lambda d - a)^2} + \lambda d + a)}{(\lambda d + a) d^2 \lambda k g \left(1 - \frac{g \lambda d}{\pi D \sin \theta} \right) \cos \theta}} \quad (3)$$

فشار در پایین دست پمپ به صورت زیر قابل محاسبه است.

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

که L نشان دهنده طول شیار می‌باشد. در جدول ۱ مقدار لگاریتم نسبت فشار بالا به پایین پمپ مولکولار برای سطح مقطع‌های مختلف آورده شده است. روند استخراج تمامی روابط مشابه با شیار دوزنقه‌ای می‌باشد.

جدول ۱: لگاریتم نسبت تراکم پمپ مولکولار با شیارهای مختلف

نوع شیار	هندسه شیار	مساحت و محیط شیار	$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{ult}$	توضیحات
مستطیلی		$A = sd$ $C = 2(s + d)$	$\frac{b'}{\frac{d \tan \theta}{k - \lambda d \cos \theta} + \frac{\pi Dh^2(\lambda + 1)}{\lambda^2 d^2 kg \left(1 - \frac{\lambda dg}{\pi D \sin \theta}\right) \cos \theta}}$	$b' = \frac{3}{4} \eta$
نیم دایره ای		$A = \frac{1}{2} \pi R^2$ $C = \pi R + 2R$	$\frac{b'}{\frac{R \tan \theta}{k - 2R \cos \theta} + \frac{2h^2 D(\pi + 2)}{\pi R^2 kg \left(1 - \frac{2Rg}{\pi D \sin \theta}\right) \cos \theta}}$	$b' = \frac{3}{\pi} \eta$
نیم بیضی		$A = 0.5\pi(ab)$ $C \cong \frac{\pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right]}{2} + 2a$	$\frac{b'}{\frac{\cos \theta}{\sin \theta} (k - 2a \cos \theta) + \frac{2h^2 D \left(\frac{\pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right]}{2} + 2a \right)}{\pi ba^2 kg \left(1 - \frac{2ga}{\pi D \sin \theta}\right) \cos \theta}}$	$b' = \frac{3}{\pi} \eta$
ترکیبی		$A = sd_p + \frac{\pi}{2} R^2$ $C = 2d_p + s + \pi R$	$\frac{sd_p + \frac{\pi}{2} R^2}{s L \cos \theta} + \frac{h^2 \pi D (2d_p + s + \pi R)}{2s(2d_p + s + \pi R) kg \left(1 - \frac{\lambda g d'}{\pi D \sin \theta}\right) \cos \theta}$	$d' = R + d_p$ $\lambda' = s/d'$

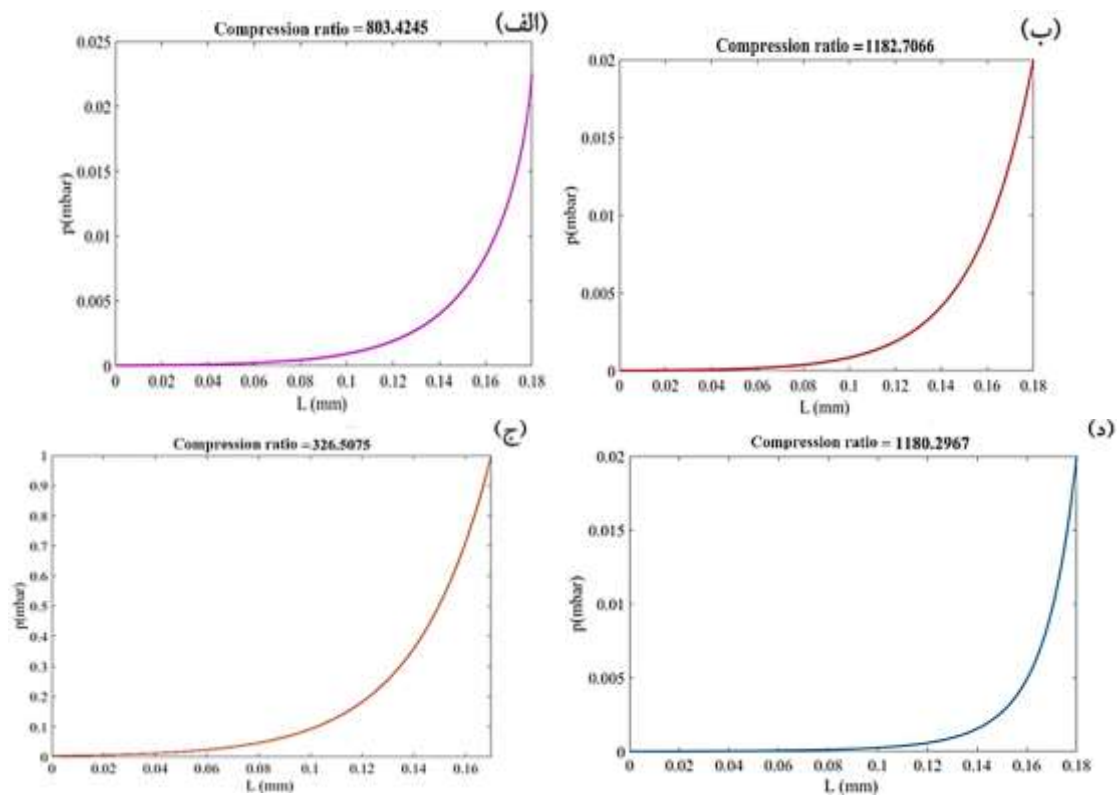
۳- نتایج

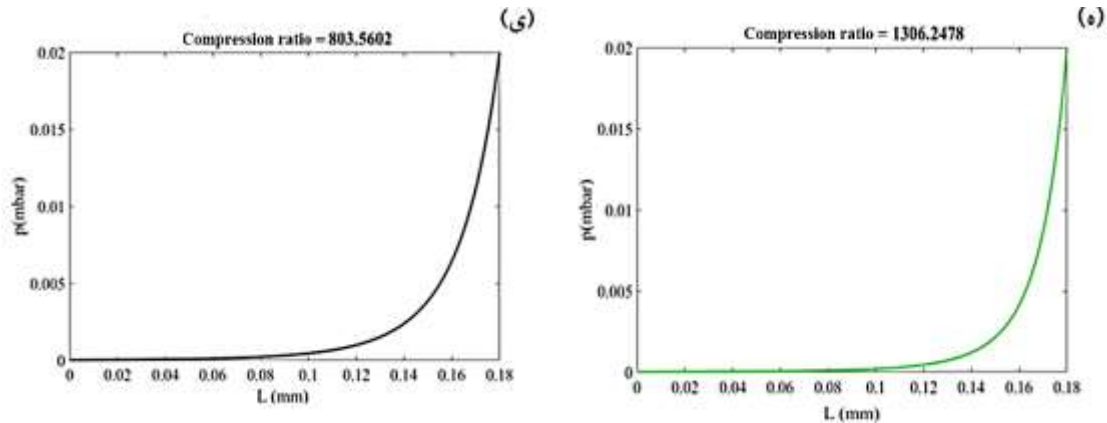
در جدول زیر ورودی‌های کد نوشته شده سیکافوس با سطح مقطع‌های مختلف ارائه شده است. در تمامی روابط از زاویه شیار با محور افق استفاده شده است. با انتخاب ورودی‌های جدول ۲، نتایج با شیارهای مختلف در ادامه مورد مقایسه قرار گرفته است. رابطه مربوط به شیار مثلثی همانند شیار ذوزنقه ای می‌باشد با این تفاوت که مقدار عرض پایین آن صفر در نظر گرفته شده است.

در جدول فوق، برای شیار مستطیل عرض بالای شیار معادل طول مستطیل و عمق شیار معادل عرض مستطیل می‌باشد. برای شیار مثلث عرض پایین شیار معادل قاعده مثلث و عمق شیار معادل ارتفاع مثلث می‌باشد. برای شیار نیم دایره عرض پایین شیار معادل قطر نیم دایره و عمق شیار معادل شعاع نیم دایره می‌باشد. همچنین از آنجایی که شیار نیم دایره‌ای حالتی از شیار بیضی می‌باشد لذا در مورد شیار بیضی، قطر شیار نیم دایره معادل قطر بزرگ بیضی و عمق شیار برابر با عمق شیار مستطیلی در نظر گرفته شده است. شکل (۲) به ترتیب توزیع فشار در طول پمپ مولکولار با روش سیکافوس را برای شیار با سطح مقطع مستطیل، ذوزنقه، مثلث، نیم دایره، بیضی و ترکیب نیم دایره و مستطیل نشان می‌دهد.

جدول (۲): ورودی های کد برای شیارهای مختلف با روش سیکافوس

عمق شیار mm	شعاع شیار mm	عرض بالای شیار mm	عرض پایین شیار mm	نوع شیار
۶/۵	-	۱۱/۸۵	۱۱/۸۵	مستطیل
۶/۵	-	۱۶	۷/۷	ذوزنقه
۶/۵	-	۱۶	-	مثلث
۸	۸	۱۶	-	نیم دایره
۶/۵	۸	۱۶	-	بیضی
۹	۸	۱۶	-	ترکیب نیم دایره و مستطیل





شکل (۲): نسبت تراکم پمپ مولکولار با سطح مقطع (لف) مستطیل، (ب) دوزنقه، (ج) مثلث، (د) نیم دایره، (ه) نیم بیضی و (ی) ترکیب نیم دایره و مستطیل

نتایج نشان می‌دهد که برای شیارهای با ابعاد هندسی مذکور، شیار بیضی شکل در شرایط یکسان عملیاتی بیشترین نسبت تراکم را ایجاد می‌کند. همچنین شیار مثلثی شکل کمترین میزان نسبت تراکم را در بین شیارهای مختلف ایجاد کرده است. دلیل برتری شیار بیضی شکل نسبت به سایر شیارها کاهش احتمال خروج ذرات از شیار می‌باشد که در شیار بیضی شکل به علت قرار گرفتن ذرات داخل محیط نیم‌بیضی ذرات بیشتری در یک نسبت سطح به حجم شیار به بالای پمپ منتقل می‌گردد.

۴- بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از کد تحلیلی سیکافوس برای پمپ مولکولار با هندسه‌های مختلف در جدول (۳) خلاصه شده است.

جدول (۳): مقایسه نسبت تراکم برای شیارهای مختلف با روش سیکافوس

نسبت تراکم	نوع شیار
۸۰۳/۴۲	مستطیل
۱۱۸۲/۷	دوزنقه
۳۲۶/۵۰۷۵	مثلث
۱۱۸۰/۲	نیم دایره
۱۳۰۶/۲۴	بیضی
۸۰۳/۵۶	ترکیب نیم دایره و مستطیل



از آنجائیکه هدف از مدلسازی پمپ مولکولار محاسبه نسبت تراکم پمپ می‌باشد و مقدار مطلوب، بیشترین مقدار نسبت تراکم در شرایط عملیاتی یکسان می‌باشد لذا با توجه به نتایج فوق شیار نیم بیضی، بیشترین مقدار نسبت تراکم را ایجاد نموده و به عنوان بهترین شیار انتخاب شده است.

۵- مراجع

- [1] W. Gaede, "Die molekularluftpumpe", Annalen der Physik, 346(7),337-380,1913
- [2] L. Maurice, "The location of the fluid pump in the cornea", Journal of physiology, 221(1),43-54,1972.
- [3] T. S. W. Sawada, "Rarefied gas flow in a rectangular groove facing a moving wall", Sci. papers, I.P.C.R , 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.