



## مدلسازی پمپ مولکولی یک سانتریفیوژ گازی با شیار مستطیلی به روش ساوادا

شادمان، محمد مهدی<sup>(۲)</sup> - یوسفی نسب، صادق\*<sup>(۱)</sup> - صفدری، سید جابر<sup>(۱)</sup> - ملاح، محمد حسن<sup>(۱)</sup> -  
خواجه نوری، مسعود<sup>(۲)</sup> - امینی، الهام<sup>(۲)</sup>

<sup>۱</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای  
<sup>۲</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری های پیشرفته ایران

### چکیده:

با توجه به آنکه فضای بین روتور و بدنه سانتریفیوژ، قبل از گازدهی خلأ می‌شود، تعدادی از مولکول‌ها با توجه به تمایل حرکت ذرات از فضای پرفشارتر به فضای کم فشارتر، از این فاصله عبور کرده، وارد فضای بین بدنه و روتور می‌شوند. به همین دلیل قطعه‌ای به نام پمپ مولکولار به انتهای بالایی متصل می‌شود. در این مطالعه پروفایل فشار در یک پمپ مولکولار با روش تحلیلی ساوادا بررسی شده است. در این روش ابتدا معادلات جریان لغزشی و سپس معادلات جریان مولکولی آزاد درون شیارهای پمپ مولکولار حل می‌شود. نتایج نهایی از کوپل جریان لغزشی و جریان مولکولی آزاد بدست می‌آید. نتایج مدلسازی به روش ساوادا نشان می‌دهد جریان درون پمپ مولکولار از رژیم مولکولی آزاد تبعیت می‌کند.  
**کلمات کلیدی:** پمپ مولکولار، جریان لغزشی، جریان آزاد مولکولی، روش ساوادا

## Molecular pump modelling of a gas centrifuge with a rectangular groove using Sawada method

Shadman, Mohammad-Mehdi<sup>2</sup>; Yousefi nasab, Sadegh\*<sup>1</sup>; Safdari, Seyed-Jaber<sup>1</sup>; Mallah, Mohammad hassan<sup>1</sup>; Khajenoori, Masoud<sup>2</sup>; Amini, Elham<sup>2</sup>;

<sup>1</sup>Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Material and Nuclear Fuel Research School

<sup>2</sup>Iran Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization of Iran

### Abstract:

Since the space between centrifuge rotor and casing have been vacuumed before gas-feeding, some molecules pass this distance to the space between the rotor and casing based on the tendency of particles movement from the spaces with higher pressures to the lower ones. Therefore, a piece named molecular pump is attached to the top end. In this study, the pressure profile at a molecular pump has been investigated using Sawada method. At first, slip flow equations and then, free molecular flow equations within the molecular pump notches are solved in this method. Final



*results of slip and free molecular flows coupling are obtained. The modelling results using Sawada show that the flow inside a molecular pump obeys the free molecular regime.*

**Keywords:** molecular pump, slip flow, free molecular flow, Sawada method

## مقدمه

ایده پمپ مولکولار اولین بار توسط جائده در سال ۱۹۱۲ مطرح و توسعه یافت که شامل یک استوانه دوار با سرعت بالا درون یک محفظه ثابت بود. جائده علاوه بر ساخت پمپ مولکولار، یک تحلیل تئوری تقریبی از پمپ مولکولار 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 [۱]. هولویک در سال ۱۹۲۳، یک مدل بزرگتر دارای شیار مارپیچ حلزونی شکل در درون محفظه ثابت، طراحی نمود که مبنای طراحی پمپ‌های مولکولار امروزی می‌باشد [۲]. در سال ۱۹۶۱، سیکافوس و همکارانش با استفاده از نتایج هولویک با در نظر گرفتن سه سطح مقطع برای شیار و با در نظر گرفتن سه جریان تاثیر گذار در حرکت جریان گاز در شیار به بررسی جریان گاز در پمپ مولکولار پرداختند [۳]. سپس ماوریس یک مدل چند شیاره ابداع نمود که ضمن کاهش نشت داخلی، توانایی فشرده سازی پمپ را افزایش می‌داد [۴]. این پمپ فشار تخلیه و نسبت تراکم بالایی داشت، اما سرعت پمپاژ پایین، استفاده از این نوع پمپ‌ها را محدود می‌نمود. ماوریس در سال ۱۹۷۴ در طراحی پمپ مولکولار، محدودیت فشار طراحی ناشی از فشار بخار روانکار مورد استفاده در قطعات جانبی روتور را مطرح نمود [۵]. 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. معادله سرعت را به ازای عدد نادسن  $0.1$  تا  $100$  ترسیم نمود [۶ و ۷]. در این مطالعه در ابتدا جریان لغزشی و معادلات حاکم بر آن بحث شده است و با استفاده از روش جداسازی متغیرها معادلات حاکم بر جریان لغزشی حل شده است. سپس معادلات حاکم بر ناحیه مولکولی بحث شده است و در انتها روش کوپل ناحیه لغزشی و مولکولی به روش تحلیلی ساوادا بحث شده است.

## ۱- تئوری

### ۱-۱- جریان لغزشی و معادله حاکم

در این بخش هدف محاسبه سرعت جریان گاز درون یک شیار در ناحیه لغزشی می‌باشد. از آنجایی که معادلات ناویر استوکس در ناحیه لغزشی دارای اعتبار می‌باشند، لذا با ساده روابط فوق در نهایت رابطه مناسبی برای سرعت جریان گاز در ناحیه لغزشی ارائه می‌شود. برای این منظور یک شیار مستطیلی که از یک طرف با یک



صفحه در حال حرکت مواجه شده، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این شکل، محورهای  $x$  و  $z$  سطح مقطع شیار و محور  $y$  امتداد شیار می‌باشد. سطوح  $(A)$  و  $(B)$  به ترتیب جریان داخل کانال و جریان نزدیک روتور می‌باشد [۷].

جریان در داخل شیار به صورت یک بعدی در طول شیار فرض شده است. همچنین جریان پایا و هم دما و تراکم ناپذیر در یک المان کوچکی به اندازه  $dy$  در نظر گرفته شده است. علاوه بر این فرض شده که نیروهای اینرسی در مقابل نیروهای ویسکوز قابل صرف نظر باشد. همچنین از نیروهای بدنی و اثرات انتهایی صرف نظر شده است. با توجه به این فرضیات، معادلات ناویر استوکس به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (1)$$

در اینجا  $v$  سرعت جریان در راستای شیار و  $P$  فشار می‌باشد. از آنجایی که  $P$  تنها تابع  $y$  می‌باشد و سطح مقطع ثابت می‌باشد، بنابراین  $\frac{\partial P}{\partial y}$  با عبارت  $\frac{dP}{dy}$  جایگزین می‌شود. در نهایت رابطه (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dy} \quad (2)$$

در سال ۲۰۰۱ باربر و ایمرسون اولین مرتبه ضریب برای شرایط سرعت لغزشی در دیواره را به صورت زیر تعریف کردند.

$$A = \frac{2 - \sigma}{\sigma} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $\sigma$  برابر ضریب تطبیق مومنتم مماسی که از ۰ تا ۱ برای انعکاس طیفی و ۱ برای انعکاس نفوذی متغیر است. سرعت لغزشی به این معناست که سرعت توده سیال روی دیواره برابر با صفر نمی‌باشد، اما جزء مماسی آن نزدیک دیواره متناسب با گرادیان نرمال آن می‌باشد. بنابراین:

$$u_y = A\lambda \frac{\partial u_y}{\partial z} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $A\lambda$  طول لغزش می‌باشد. برای حل معادله فوق نیاز به دو شرط مرزی در جهت  $x$  و دو شرط مرزی در جهت  $z$  می‌باشد. شرایط مرزی لغزشی برای شیار به صورت زیر می‌باشد.

$$= v(x, 0) V + A\lambda \frac{\partial v}{\partial z}(x, 0) \quad (5)$$

$$= v(x, b) - A\lambda \frac{\partial v}{\partial z}(x, b) \quad (6)$$

$$= v(0, z) A\lambda \frac{\partial v}{\partial x}(0, z) \quad (7)$$

$$= v(a, z) A\lambda \frac{\partial v}{\partial x}(a, z) \quad (8)$$



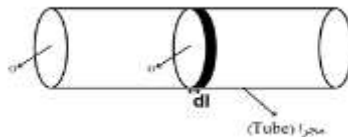
برای محاسبه دبی حجمی بر واحد عرض شیار، با توجه به اینکه  $0 < x < a$  و  $\delta < z < b$  می‌باشد، از روش جداسازی متغیرها استفاده شده است و رابطه (۹) بدست آمده است.

$$q = \frac{Av}{a} = \frac{b}{\xi} \int_{\delta/b}^1 \int_0^{a/b} v(x, z) dx dz = q_v bV + q_p \frac{b^3}{2\mu^2} \mu \frac{\partial P}{\partial y} \quad (9)$$

که  $q_v$  (دبی حجمی بر واحد عرض شیار ناشی از مولد سرعت) و  $q_p$  (دبی حجمی بر واحد عرض شیار ناشی از مولد گرادیان فشار) می‌باشند.

### ۱-۲- معادلات حاکم بر ناحیه مولکولی

طبق تئوری ناسن، سرعت جریان جرمی گاز، از مساوی قرار دادن مومنتم مولکول‌های گاز وارد شده به قسمتی از دیواره به طول  $dy$  بر واحد زمان با اختلاف در نیروی اعمال شده توسط فشار روی دو سطح مقطع المان انتخاب شده، حاصل می‌شود. برای یک لوله استوانه‌ای مانند شکل (۳) یک المان  $dl$  از طول لوله را در نظر بگیرید،  $O$  محیط آن و  $A$  سطح مقطع آن باشد. رابطه (۱۰) برای شکل (۳) صادق است.



شکل ۳. شماتیک المان انتخاب شده در یک لوله جهت محاسبه مومنتم وارده به دیواره‌ها

$$\frac{3}{8} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \rho \sqrt{\frac{P}{\rho}} O v = -A \left( \frac{dp}{dl} \right) dl dt \quad (10)$$

در این رابطه  $O$  محیط دیسک انتخابی بین روتور و بدنه می‌باشد. به طور خلاصه می‌توان گفت هدف به دست آوردن سرعت مولکولی می‌باشد که از مساوی قرار دادن مقادیر مومنتم حاصل از برخورد ذرات به دیواره و گرادیان نیروی اعمال شده به دو طرف المان انتخاب شده به دست می‌آید. با به دست آوردن تعداد مولکول‌های حرکت کرده به سمت المان سطحی و سپس انتخاب مولکول‌هایی که با یکدیگر برخوردی نداشته‌اند و احتمال زاویه برخورد آنها با المان انتخابی در نظر گرفته شده است، می‌توان مومنتم آنها را به دست آورد. در انتها با تساوی قرار دادن این مومنتم با مومنتم حاصل از نیرو، می‌توان مقدار سرعت مولکول‌ها در راستای دیواره بین روتور و بدنه را به صورت زیر به دست آورد.



$$\frac{3}{8} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \rho \sqrt{\frac{P}{\rho}} [2v(a+b-\delta) - Va] = -AC_1 \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_g \quad (11)$$

در اینجا  $V$  سرعت دیواره متحرک مقابل شیار،  $\rho$  دانسیته گاز،  $A$  سطح مقطع شیار  $(ab)$  و  $C_1$  فاکتور اصلاح شده وابسته به نسبت طول به عرض شیار) برابر  $1/14$  می‌باشد.

### ۱-۳- محاسبه دبی حجمی بر واحد عرض شیار در ناحیه کاملاً مولکولی

با توجه به تعریف دبی حجمی و جایگذاری رابطه (۱۱) (معادله سرعت در ناحیه کاملاً مولکولی) در آن دبی حجمی بر واحد عرض شیار در ناحیه کاملاً مولکولی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$q = \frac{Av}{a} = \frac{1}{2} \frac{A}{a+b-\delta} V - \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{\rho}{P}} \frac{bA}{a+b-\delta} C_1 \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_g \quad (12)$$

دبی حجمی بر واحد عرض شیار برای سطوح  $A$  و  $B$  شکل (۱) به صورت زیر حاصل شده است.

$$q_m = \left(\frac{1}{2} \frac{a(b-\delta)}{(a+b-\delta)b}\right) bV - \left(\frac{16}{3\pi} \frac{\lambda a(b-\delta)C_1}{b^2(a+b-\delta)}\right) \frac{b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_g \quad (13)$$

$$q'_m = \left(\frac{1}{2} \frac{a\delta}{(a+b-\delta)b}\right) bV - \left(\frac{16}{3\pi} \frac{\lambda a\delta C_1}{b^2(a+b-\delta)}\right) \frac{b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_g \quad (14)$$

### ۱-۴- ترکیب رژیم های جریان کاملاً مولکولی و لغزشی

از آنجایی که در پمپ مولکولار ناحیه گذارا وجود دارد، بنابراین ساوادا برای بررسی این ناحیه معادله حاکم در دو ناحیه لغزشی و کاملاً مولکولی را بطور جداگانه محاسبه نموده و سپس با فاکتور وزنی  $k$  این دو ناحیه را ترکیب نموده است.

ساوادا بخشی از مولکول‌ها که بدون برخورد با مولکول‌های دیگر، فاصله  $\gamma$  طی می‌کنند را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$P(\gamma) = \exp(-\gamma/\lambda) \quad (15)$$

میانگین فاصله‌ای که مولکول‌ها از یک دیوار تا دیوار دیگر بدون برخورد طی می‌کنند برابر با  $8\gamma_m$  می‌باشد، که میانگین عمق سیال از شیار برابر  $ab/[2(a+b-\delta)]$  می‌باشد. در ابتدا کسری از مولکول‌ها که در سطح دیواره رفتار کاملاً مولکولی دارند به صورت ترم  $\exp(-8\gamma_m/\lambda)$  می‌باشد. بنابراین کسری از مولکول‌ها ( $k$ ) که رفتار کاملاً مولکولی دارند به وسیله ضریب اصلاحی  $G_2$ ، که کمتر از واحد می‌باشد به صورت زیر نوشته می‌شود:

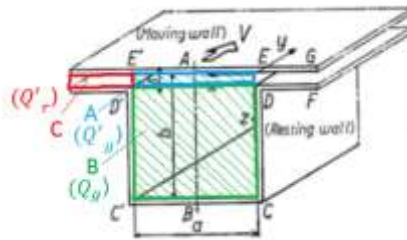
$$k = \exp(-8C_2\gamma_m/\lambda) \quad (16)$$

با توجه به رابطه فوق، وقتی فشار به اندازه کافی افزایش یابد مقدار  $k$  به سمت مقدار صفر میل می‌کند و زمانی که فشار تا مقدار صفر کاهش می‌یابد مقدار  $k$  به مقدار یک میل می‌کند. به وسیله فاکتور وزنی  $k$  دو جریان کاملاً مولکولی و لغزشی به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند. ترکیب خطی این دو جریان به صورت زیر بیان می‌شود.

$$q_v = kq_{mv} + (1-k)q_{sv} \quad , \quad q_p = kq_{mp} + (1-k)q_{sp} \quad (17)$$

$$q'_v = kq'_{mv} + (1-k)q'_{sv} \quad , \quad q'_p = kq'_{mp} + (1-k)q'_{sp} \quad (18)$$

با توجه به شکل (۴)،  $(Q_g)_y$  و  $(Q_g)_x$  دبی جرمی بر واحد عرض شیار به ترتیب در جهت  $x$  و  $y$  (برای سطح A) و همچنین  $(Q'_g)_y$  و  $(Q'_g)_x$  دبی جرمی بر واحد عرض شیار به ترتیب در جهت  $x$  و  $y$  (برای سطح B) می‌باشد.



شکل ۴: نحوه نمایش شیار پمپ مولکولار و نامگذاری قسمت‌های مختلف آن

مقادیر  $(Q_g)_x$ ،  $(Q_g)_y$ ،  $(Q'_g)_x$  و  $(Q'_g)_y$  به صورت زیر بیان می‌شود.

$$(Q_g)_x = 0 \quad (19)$$

$$(Q_g)_y = q_v \rho b U \cos \alpha + q_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)_g \quad (20)$$

$$(Q'_g)_x = -q'_v \rho b U \sin \alpha + q'_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_g \quad (21)$$

$$(Q'_g)_y = q'_v \rho b U \cos \alpha + q'_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)_g \quad (22)$$

در اینجا  $\left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_g$  و  $\left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)_g$  گرادیان فشار در جهت  $x$  و  $y$  در شیار می‌باشد. مقدار دبی جرمی بر واحد عرض شیار

در جهت  $x$  و  $y$  نزدیک دیوار متحرک (روتور) با  $(Q_r)_x$  و  $(Q_r)_y$  در جهت  $x$  و  $y$  به صورت عبارت زیر بیان می‌شود:

$$(Q_r)_x = -\gamma_v \rho b U \sin \alpha + \gamma_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_r \quad (23)$$

$$(Q_r)_y = \gamma_v \rho b U \cos \alpha + \gamma_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)_r \quad (24)$$



در اینجا  $\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_r$  و  $\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_r$  گرادیان فشار در جهت  $x$  و  $y$  در نزدیک دیواره محرک (روتور) می‌باشد. با توجه به روابط بالا دبی جرمی در شیار و ناحیه بالای آن در جهت  $x$  با دبی جرمی در جهت  $x$  نزدیک دیواره محرک برابر می‌باشد.

$$(Q_g)_x + (Q'_g)_x = (Q_g)_x \quad (25)$$

گرادیان فشار در شیار و ناحیه نزدیک دیواره متحرک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d\bar{P}}{dl} \cos \alpha = \epsilon \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_g + (1 - \epsilon) \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_r \quad (26)$$

$$\frac{d\bar{P}}{dl} \sin \alpha = \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_g = \left(\frac{\partial P}{\partial y}\right)_r \quad (27)$$

در اینجا  $\epsilon$  نسبت عرض شیار می‌باشد  $(a/(a+b))$ . مقدار فشار و دبی داخل شیار با نسبت عرض آن‌ها متناسب می‌گردند که می‌توان با نسبت بستن مقدار عرض‌های دو قسمت شیار و گلوگاه آن مقدار فشار و دبی متناسب برای هر کدام از نواحی را به دست آورد. توزیع فشار مطابق روابط زیر بدست می‌آید.

$$Q = \left[ \epsilon \left\{ (Q_g)_x + (Q'_g)_x \right\} + (1 - \epsilon)(Q_r)_x \right] \cos \alpha + \left[ \epsilon \left\{ (Q_g)_y + (Q'_g)_y \right\} + (1 - \epsilon)(Q_r)_y \right] \sin \alpha \quad (28)$$

$$\frac{d\bar{P}}{dl} = \frac{2\mu U F \cos \alpha \sin \alpha + \frac{2\mu G Q}{\rho b}}{b^2 \left( H \sin^2 + \frac{\gamma_p q'_p}{\epsilon} \right)} \quad (29)$$

$$F = -(1 - \epsilon) \left\{ q'_p (q_v + q'_v - \gamma_v) + \gamma_p \left( \frac{\epsilon}{\epsilon + 1} q_v - q'_v + \gamma_v \right) \right\} \quad (30)$$

$$G = -\frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon} q'_p + \gamma_p \quad (31)$$

$$H = (1 - \epsilon) \left\{ q'_p (q_p + q'_p) + \gamma_p \left( \frac{\epsilon}{\epsilon + 1} q_p - 2q'_p + \gamma_p \right) \right\} \quad (32)$$

## ۲- بحث و نتایج

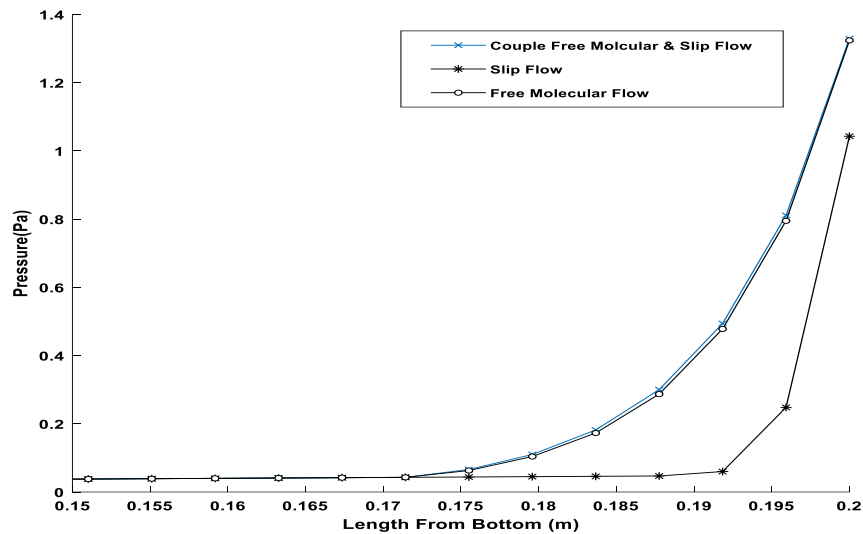
مشخصات ذکر شده در جدول (۱) به عنوان مشخصات پمپ مولکولار فرضی در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۱. مشخصات پمپ مولکولار ماشین فرضی

عرض شیار	عمق شیار	فاصله از شیار مجاور	فاصله لقی	زاویه شیار با محور عمودی	طول پمپ	سرعت محیطی روتور
۱۵ میلی متر	۸ میلی متر	۵ میلی متر	۱ میلی متر	۳۰ درجه	۲۰ سانتی متر	۶۵۰ متر بر ثانیه



شکل (۵) تغییرات فشار در طول پمپ مولکولار با روش تحلیلی ساوادا برای حالت مولکولی آزاد، جریان لغزشی و ترکیب دو ناحیه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۵) پروفایل فشار در طول پمپ به ناحیه مولکولی آزاد نزدیک تر است. بنابراین طبق روش ساوادا جریان مولکولی آزاد نسبت به جریان لغزشی غالب می‌باشد.



شکل ۵. تغییرات فشار در طول پمپ مولکولار با روش ساوادا

### ۳- نتیجه گیری

پمپ مولکولی تجهیزی دو سر باز مشتمل بر دو سیلندر هم محور یکی ثابت و دیگری متحرک است. در اثر چرخش عضو متحرک و وجود شیارهای ماریچ روی جدار داخلی سیلندر ثابت، مولکول‌های گاز که دارای سرعت حرارتی می‌باشند با برخورد به سطح متحرک مؤلفه سرعتی در جهت چرخش سیلندر متحرک در شیارها به خود می‌گیرند. این سطح متحرک باید از نظر مکانیکی تا حد امکان به قسمت ثابت نزدیک باشد تا نشت گاز به حداقل برسد. در این مطالعه به بررسی روش ساوادا جریان درون پمپ مولکولار پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد طبق روش تحلیلی ساوادا جریان غالب درون پمپ مولکولار جریان مولکولی آزاد می‌باشد.

### ۴- مراجع

- [1] W. Gaede, "Die molekularluftpumpe," *Phys. Z.*, vol. 13, p. 864, 1912.
- [2] F. Holweck, "Pumpe molecular helicoid ale," *Onde. Elect.*, vol. 21, p. 497, 1923.
- [3] N. N. B. L. A. Sickafus, "The holweck type molecular pump," university of virginia, 1961.
- [4] L. Maurice, "The location of the fluid pump in the cornea," *Journal of physiologh*, 1972.
- [5] L. Maurice, "Pivot for rotating molecular pump," *Jpn. Appl. Phys. Suppl.*, vol. 2, p. 21, 1974.





بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۱ اسفندماه ۱۳۹۷- دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)



- 
- [6] T. Saeada, "Rarefied gas flow in a rectangular groove facing a moving wall," *Sci. papers, I.P.C.R.*, vol. 70, no. 4, pp. 79-86, 1976.
- [7] T. S. W. Sawada, "Pumping mechanism of helical grooved molecular drag pumps," *Journal of vacuum science & technology*, vol. 17, no. 4, pp. 2069-2074, 1999.