

## بهینه سازی پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار ماشین سانتریفیوژ با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری

مسعود خواجه نوری<sup>۱\*</sup>، سید جابر صفدری<sup>۱</sup>، صادق یوسفی نسب<sup>۱</sup>، محمد حسن ملاح<sup>۱</sup>، محمد حسین عسکری<sup>۱</sup>

۱. شرکت فناوری های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۹۳۱-۱۴۳۹۹۵، تهران- ایران

۲. پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

### چکیده:

پمپ مولکولار قطعه ثابت در فضای خارجی روتور یک سانتریفیوژ می‌باشد. پمپ مولکولار 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. 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 مولکولار روی قسمت بالایی بدنه متصل می‌شود. یکی از روش های تحلیل جریان گاز درون پمپ مولکولار، حل معادلات جریان با روش سیکافوس و همکارانش می‌باشد که با توجه به کاهش زمان محاسبات، بسیار مفید می‌باشد. در بهینه سازی پمپ مولکولار، هدف عبارت است از حداقل نمودن فشار در پایین پمپ که این امر متاثر از بهینه نمودن مجموعه ای از پارامترهای عملیاتی و هندسی پمپ می‌باشد. در این مقاله برای بهینه کردن مهمترین پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار از سه الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین الگوریتم های فرا ابتکاری، بهینه سازی با الگوریتم نهنگ بیشترین نسبت تراکم برای پمپ مولکولار حاصل می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: پمپ مولکولی، روش تحلیلی سیکافوس، بهینه سازی

## Optimization of geometric and operational parameters of molecular centrifugal pump using meta-heuristic algorithms

Masoud khajenoori<sup>۱\*</sup>, Jaber safdari<sup>۱, 2</sup>, Sadegh Yousefi-Nasab<sup>۱, 2</sup>, Mohammad Hassan Mallah<sup>۱, 2</sup>, Mohammad Hossein Askari<sup>۱</sup>

1. Iran Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization of Iran

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

### Abstract:

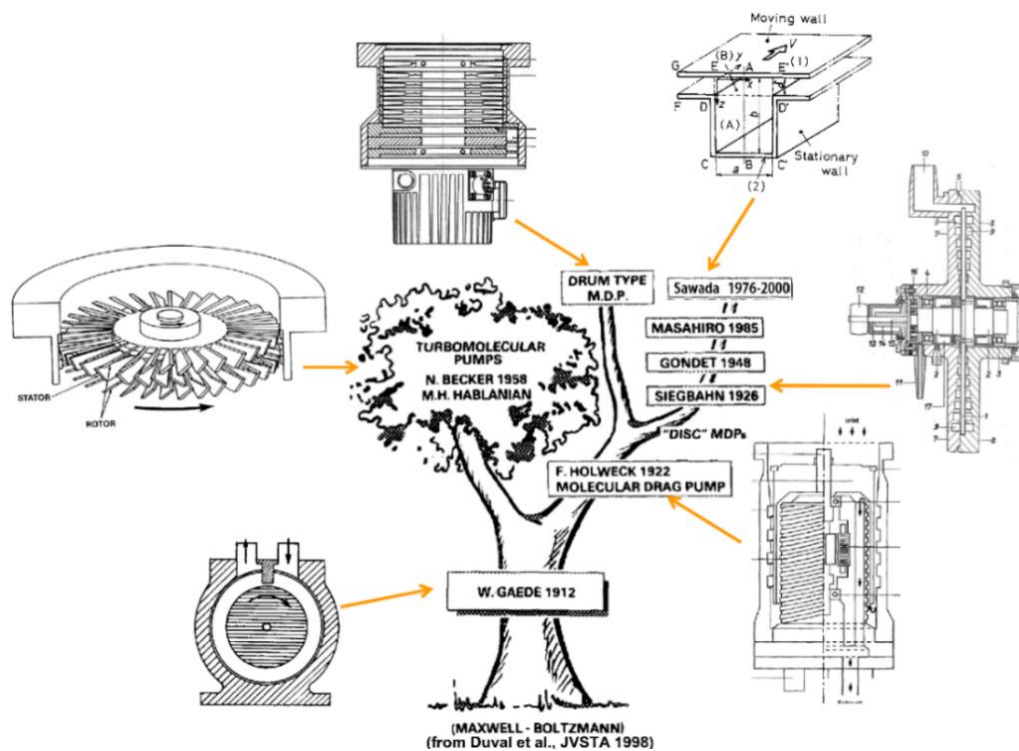
The molecular pump of the fixed part outside the rotor is a centrifuge. The molecular pump has grooves that deviate when moving particles due to the direction of the grooves, so that they return to the rotor. Maintaining a vacuum in the space between the rotor and the body is important during the gasification and enrichment process. For this reason, a piece called a molecular pump is attached to the upper part of the body. One of the methods for analyzing the gas flow inside the molecular pump is to solve the flow equations by the method of Sikafus et al., Which is very useful due to the reduction of computation time. In molecular pump optimization, the goal is to minimize the pressure at the bottom of the pump, which is influenced by optimizing a set of operational and geometric parameters of the pump. In this paper, three metaheuristic algorithms are used to optimize the most important geometric and operational parameters of the molecular pump. The results show that among the meta-heuristic algorithms, the optimization with the whale algorithm achieves the highest compression ratio for the molecular pump.

**Keywords:** Molecular pump, Sikafus analytical method, Optimization

Email: khajenoori1390@gmail.com

## 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 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. 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. 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 [۲-۳]. نمودار درختی توسعه پمپ مولکولی تا سال ۲۰۰۰ در شکل زیر ترسیم شده است.



شکل ۱. تاریخچه درختی پمپ مولکولی

روش‌های مختلفی مانند روش تحلیلی ساوادا و روش سیکافوس و همکارانش جهت مدلسازی پمپ مولکولی استفاده شده است. روش تحلیلی حل معادلات جریان با روش سیکافوس و همکارانش با توجه به کاهش زمان محاسبات، بسیار مفید می‌باشد [۴]. در روش تحلیلی سیکافوس و همکارانش سه عامل تأثیر گذار در ایجاد جریان در یک شیار پمپ هولویک در نظر گرفته شده است. مجموع سه جریان ناشی از "حرکت صفحات روتور در شیارها، گرادیان فشار و لقی بین روتور و شیارها" را به عنوان جریان درون یک شیار پمپ هولویک در نظر گرفته شده است. در مقاله حاضر با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، مقادیر بهینه برای پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه پمپ مولکولار نظیر: لقی پمپ، زاویه شیار، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار، برای ماشین فرضی استخراج شده است. در واقع علت استفاده از سه الگوریتم بهینه سازی رسیدن به شرایط بهینه (پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه) می‌باشد که در این شرایط، پمپ مولکولار بهترین عملکرد را خواهد داشت. نتایج الگوریتم‌های مختلف در قالب یک جدول با یکدیگر مقایسه شده است. الگوریتم مناسب از بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری انتخاب شده است. سپس تکرار پذیری الگوریتم مورد

بررسی قرار گرفته است. از آنجائیکه طول پمپ مولکولار می‌تواند در ایجاد توان اصطکاکی پمپ مولکولار تاثیر مستقیمی داشته باشد همچنین افزایش و یا کاهش بیش از حد طول پمپ مولکولار به میزانی که در مقدار توان می‌تواند تاثیر بگذارد در نسبت تراکم ایجاد شده برای پمپ تاثیر ندارد لذا تعیین یک طول مناسب برای پمپ مولکولار در ایجاد نسبت تراکم و توان اصطکاکی بهینه می‌تواند بسیار مهم باشد لذا با استفاده از طول های مختلف پمپ به بهینه سازی سایر پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار پرداخته شده است.

## ۲. روش کار

### ۱.۲. الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری

#### ۱.۱.۲. الگوریتم فرا ابتکاری SA<sup>1</sup>

شبیه سازی حرارتی یا به اختصار (SA) یک روش الهام گرفته از طبیعت و مبتنی بر احتمالات برای یافتن پاسخ بهینه در مسائلی با فضای جست و جوی بسیار بزرگ است. تلاش برای یافتن حالت‌های همسایه‌ی هر جواب یک بخش اساسی از الگوریتم بهینه سازی SA را تشکیل می‌دهد. دلیل اصلی این کار این است که جواب بهینه نهایی با انجام جست و جوی متوالی در حالت‌های همسایه‌ی حالت تصادفی اولیه به دست خواهد آمد.

در روش فراابتکاری تابع هدف ماکزیمم مقدار لگاریتم نسبت فشار بالا و پایین پمپ مولکولار می‌باشد. تابع هدف، ماکزیمم مقدار لگاریتم نسبت فشار بالا و پایین پمپ مولکولار می‌باشد. پارامترهای هندسی و عملیاتی مورد استفاده عبارتند از: طول، زاویه شیار، لقی، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار. در تکرار اول، الگوریتم فرا ابتکاری تعداد زیادی از نقاط را به صورت تصادفی توزیع می‌کند و به ازای این نقاط با استفاده از رابطه تحلیلی سیکافوس، ماکزیمم مقدار نسبت لگاریتم فشار را محاسبه می‌کند. سپس در تکرارهای بعدی نقاط مناسب تری را که به ازای آن، مقدار لگاریتم نسبت فشار ماکزیمم می‌گردد به صورت هوشمند پیدا می‌کند این کار تا جایی که بیشترین مقدار لگاریتم نسبت فشار حاصل شود ادامه می‌یابد. در نهایت به ازای مقادیر ورودی (قید) که به صورت دامنه‌ای از اعداد معرفی شده مقدار مناسب پارامتر محاسبه می‌گردد [۵].

#### ۲.۱.۲. الگوریتم گرگ خاکستری<sup>۲</sup>

الگوریتم گرگ خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران ایشان در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته‌جمعی آن‌ها ارائه شده است. گرگ خاکستری از خانواده گرگ‌های کشور کانادا است. گرگ‌های خاکستری در بالای زنجیره غذایی قرار دارند و ترجیح می‌دهند به صورت گروهی زندگی کنند. به‌طور میانگین، تعداد اعضای گروه‌های آن‌ها ۱۲-۵ عدد است [۶]. در الگوریتم گرگ خاکستری فرض می‌شود که در هر زمان، دقیق‌ترین اطلاع از موقعیت احتمالی طعمه (محل بهینه) را گرگ آلفا در اختیار دارد و پس از آن گرگ‌های بتا و دلتا؛ بنابراین در الگوریتم با ترکیب اطلاعات گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا، موقعیت بعدی عامل جست‌وجو تعیین می‌شود و به او دستور حرکت به سمت محل تعیین شده داده می‌شود. به توجه به موقعیت اعلام شده به عامل جست‌وجو، یک مسیر دایره‌ای حول طعمه برای عامل جست‌وجو مشخص می‌شود که در هر نقطه‌ای از این دایره می‌تواند قرار بگیرد. لازم به ذکر است در صورت نیاز به جزئیات بیشتر در رابطه با این الگوریتم، می‌توان به مرجع [۶] مراجعه نمود.

<sup>1</sup> Simulated Annealing

<sup>2</sup> Grey Wolf

### ۳.۱.۲. الگوریتم بهینه سازی نهنگ<sup>۳</sup>

یکی از بزرگ‌باله‌ترین نهنگ‌ها، نهنگ گوژ پشت است. نهنگ‌های گوژ پشت ترجیح می‌دهند تا دسته‌ای از کرپل‌ها و یا ماهی‌های کوچک را در نزدیک سطح آب شکار کنند. الگوریتم WOA یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت است که در زمینه‌های مختلف می‌توان از آن استفاده کرد. نهنگ‌های گوژ پشت می‌توانند مکان شکار را شناسایی کرده و آنها را محاصره کنند. از آنجایی که مکان طراحی بهینه در فضای جستجو از راه قیاس شناخته نمی‌شود، الگوریتم WOA فرض می‌کند که بهترین راه حل، شکار هدف بوده و یا نزدیک به حالت مطلوب است. بعد از اینکه بهترین عامل جستجو شناسایی شد، عوامل دیگر جستجو سعی می‌کنند تا مکان خود را نسبت به بهترین عامل جستجو، به روزرسانی کنند. جهت مدلسازی این رفتار همزمان، فرض شده است که نهنگ با احتمال ۵۰ درصد از بین مکانیزم محاصره‌ای انقباضی و یا مدل مارپیچی یکی را انتخاب می‌کند تا موقعیت نهنگ‌ها در طول بهینه‌سازی به روزرسانی شود [۷]. هر سه الگوریتم ذکر شده در این مقاله از نوع الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشند. دو مساله مهم در الگوریتم‌های فراابتکاری، گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی، همگرایی زودرس به این نقاط است. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برونرفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند. تنها تفاوت این سه روش در نحوه رسیدن به نقطه بهینه و زمان رسیدن به آن می‌باشد.

### ۳.۱.۲. تابع هدف و قید بهینه سازی

هدف به حداقل رساندن فشار پایین پمپ مولکولار یا ماکزیمم رساندن مقدار تابع  $\ln \frac{P_2}{P_1}$  جهت بهینه شدن عملکرد پمپ تعریف شده است. هیچ گونه قیدی برای پمپ مولکولار وجود ندارد. نسبت لگاریتم تراکم برای  $g$  شیار به صورت زیر حاصل شده است [۴].

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

نسبت فشار پمپ به صورت زیر قابل محاسبه است.

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

به عبارت دیگر، مقادیر پارامترهای هندسی و عملیاتی بی‌پمپ مولکولار نظیر: لقی پمپ، زاویه شیار، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار، برای ماشین فرضی بگونه‌ای همزمان تغییر داده شده تا تابع هدف  $\left( \ln \frac{P_2}{P_1} \right)$  بیشترین مقدار خود را داشته باشد.

<sup>3</sup> Whalf Algorithm

### ۳. نتایج

لیست متغیرهای بهینه‌سازی به همراه دامنه تغییرات در نظر گرفته شده برای پمپ مولکولار ماشین فرضی در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۲. متغیرهای بهینه‌سازی و محدوده تغییرات آن‌ها برای ماشین فرضی

حد بالا	حد پایین	کمیت
۱۶	۷	عرض بالای شیار (mm)
۱۶	۷	عرض پایین شیار (mm)
۱۲	۵	عمق شیار (mm)
۲	۱	فاصله لقی (mm)
۲۵	۱۵	طول پمپ (cm)
۳۳۰	۳۰۰	دما (K)
۳۰	۱۵	زاویه شیار با محور عمود (درجه)
۱۶	۷	تعداد شیار

با استفاده از سه الگوریتم فرا ابتکاری، مقادیر بهینه برای مهمترین پارامترهای هندسی و عملیاتی نظیر: زاویه شیار، لقی، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار محاسبه شد. نتایج بهینه این پارامترها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای پمپ مولکولار ماشین فرضی در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول ۳. پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای ماشین فرضی

نوع الگوریتم	عرض بالای شیار (mm)	عرض پایین شیار (mm)	عمق شیار (mm)	لقی (mm)	دما (k)	زاویه شیار با محورافق	تعداد شیار	نسبت تراکم
DA	۱۵	۹/۰۱	۶	۱/۲	۳۰۰	۲۰/۷۸	۱۰	۱۷۲۲۱
GWO	۱۳	۸/۳۴	۷	۱/۳	۳۱۵	۲۰/۲	۱۰	۱۶۲۰۰
WOA	۱۴	۹/۳۵	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰	۱۸۸۷۱/۳

الگوریتم فرا ابتکاری WOA با توجه به نسبت تراکم  $18871/3$  به عنوان الگوریتم مناسب جهت بهینه‌سازی پمپ مولکولار ماشین فرضی انتخاب می‌گردد. در ادامه نتایج بهینه‌سازی پارامترهای هندسی و عملیاتی الگوریتم WOA به منظور بررسی تکرار پذیری در ۵ بار اجراء در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۰۴. پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری WOA در تکرارهای مختلف

تکرار	عرض بالای شیار (mm)	عرض پایین شیار (mm)	عمق شیار (mm)	لقی (mm)	دما (k)	زاویه شیار با محورافق	تعداد شیار
۱	۱۴	۹/۳۴	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰
۲	۱۴	۹/۴۰	۷	۱/۱	۳۱۱	۲۱	۱۰
۳	۱۴	۹/۳۵	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰
۴	۱۴	۹/۳۵	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰
۵	۱۴	۹/۳۴	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰

از آنجائیکه طول پمپ مولکولار می‌تواند در ایجاد توان اصطکاکی پمپ مولکولار تاثیر مستقیمی داشته باشد همچنین افزایش و یا کاهش بیش از حد طول پمپ مولکولار به میزانی که در مقدار توان می‌تواند تاثیر بگذارد در نسبت تراکم ایجاد شده برای پمپ تاثیر ندارد لذا تعیین یک طول مناسب برای پمپ مولکولار در ایجاد نسبت تراکم می‌تواند بسیار مهم باشد لذا در این قسمت با استفاده از طول‌های مختلف پمپ به بهینه‌سازی سایر پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار پرداخته شده است تا بتوان با انتخاب یک نسبت تراکم مناسب کمترین طول پمپ انتخابی صورت گیرد. در جدول زیر پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری WOA انتخاب شده به ازای طول‌های مختلف پمپ ارائه شده است.

جدول ۰۵. پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری WOA به ازای طول‌های مختلف پمپ

طول پمپ (mm)	عرض بالای شیار (mm)	عرض پایین شیار (mm)	عمق شیار (mm)	لقی (mm)	دما (k)	زاویه شیار با محورافق	تعداد شیار	نسبت تراکم
۱۵۰	۱۴	۹/۲۸	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰	۳۱۴
۱۷۰	۱۴	۹/۳۱	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰	۱۲۳۷
۲۰۰	۱۴	۹/۳۲	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰	۲۶۸۷
۲۵۰	۱۴	۹/۳۴	۷	۱/۱	۳۱۰	۲۱	۱۰	۱۸۸۷۱/۳

با توجه به جدول فوق مشاهده می‌گردد با افزایش طول پمپ نسبت تراکم آن افزایش می‌یابد بنابراین جهت انتخاب طول مناسب برای پمپ مولکولار ماشین فرضی می‌بایستی توان اصطکاکی فضای بیرونی روتور بر اساس نسبت تراکم‌های بدست آمده براساس جدول فوق محاسبه گردد و در صورت مقدار توان اصطکاکی مجاز ماشین، طول پمپ مولکولار مورد نظر از بین موارد فوق انتخاب گردد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، مقادیر بهینه برای پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار نظیر: لقی پمپ، زاویه شیار، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار، برای ماشین فرضی استخراج گردید. نتایج الگوریتم‌های مختلف در قالب یک جدول با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد در بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری، با پارامترهای بهینه شده با الگوریتم نهنگ بیشترین نسبت تراکم حاصل می‌گردد. سپس تکرار پذیری الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش طول پمپ نسبت تراکم آن افزایش می‌یابد بنابراین جهت انتخاب طول مناسب برای پمپ مولکولار ماشین فرضی می‌بایستی توان اصطکاکی فضای بیرونی روتور بر اساس نسبت تراکم محاسبه گردد و طول پمپ مولکولار مورد نظر از بین موارد فوق انتخاب گردد.

## ۵. مراجع

- [1] W. Gaede, "Die molekularluftpumpe", Annalen der Physik, 346(7), 337-380, 1913.
- [2] T. Sawada, "Rarefied gas flow in a rectangular groove facing a moving wall", Sci. papers, 70 (4), 79-86, 1976.
- [3] T. S. W. Sawada, "Pumping mechanism of helical grooved molecular drag pumps", Journal of vacuum science & technology, 17(4), 2069-2074, 2000.
- [4] 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.
- [5] S. Mirjalili, "Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single objective, discrete and multi objective problems," Neural Computing and Applications, vol. 27, no. 4, 2016 .
- [6] S. Mirjalili, S. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46-61, 2014 .
- [7] ح. رحیمی و م. یعقوبی، "بهبود الگوریتم سینوس کسینوس در حل مسائل بهینه سازی،" در دومین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های دانش بنیان در مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، ۱۳۹۶.