



بهینه‌سازی پمپ مولکولار با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری: روش سیکافوس ارتقا یافته

مسعود خواجه‌نوری^{۱*}، صادق یوسفی‌نسب^۲، سید جابر صفدری^۳، صبا باصیری^۲

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کدپستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، کاشان - ایران

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

۳. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، اصفهان - ایران

*Email: khajenoori@kashanu.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

چکیده

حفظ خلأ در فضای بین روتور و بدنه یک ماشین سانتریفیوژ گازی در حین فرایند گازدهی و غنی‌سازی حائز اهمیت است. به همین دلیل پمپ مولکولار روی قسمت بالایی بدنه متصل می‌شود که 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 بازگردند. یکی از روش‌های تحلیل جریان گاز درون پمپ مولکولار، حل معادلات جریان با روش سیکافوس و همکاران می‌باشد که با توجه به کاهش زمان محاسبات، بسیار مفید می‌باشد. در این مقاله جهت دستیابی به پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه پمپ مولکولار از چهار الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه‌سازی با الگوریتم نهنگ گوژ پشت (WOA) بیشترین نسبت تراکم برای پمپ مولکولار ایجاد می‌گردد. مقدار انحراف متوسط مطلق لگاریتم نسبت تراکم فشار با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش سیکافوس ارتقا یافته با پارامترهای بهینه، نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب روش تجربی و روش مذکور با الگوریتم فراابتکاری WOA می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم فراابتکاری، پمپ مولکولار، روش سیکافوس، نسبت تراکم

Optimization of molecular pump by meta-heuristic algorithms: modified Sickafus method

M. Khajenoori^{*1}, S. Yousefi-Nasab², S.J. Safdari², S. Basiri³

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Postal Code: 8731753153, Kashan – Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

3. Faculty of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Postal Code: 8415683111, Isfahan - Iran

Research Article

Received: 06.07.2024,

Revised: 22.09.2024,

Accepted: 28.09.2024

Abstract

It is important to maintain the vacuum in the space between the rotor and the body of a gas centrifuge machine during the gasification and enrichment process. For this reason, a molecular pump is connected to the upper part of the body. The pump has grooved that particles collide with as they move. Depending on the direction of the grooves, the particles are deflected and return to the rotor. One method of analyzing the gas flow inside the molecular pump is by solving the flow equations using the Sickafus method and his colleagues. This method is useful because it reduces calculation time. In this article, four meta-heuristic algorithms were used to determine the optimal geometric and operational parameters of the molecular pump. The results indicate that among the meta-heuristic algorithms, optimization with the humpback whale algorithm (WOA) produces the highest compression ratio for the molecular pump. The average absolute deviation value of the logarithm of the pressure density ratio, when compared to values predicted by the upgraded Sickafus method with optimal parameters, shows a very good agreement between the experimental method and the upgraded Sickafus method using the meta-heuristic WOA algorithm.

Keywords: Meta-heuristic algorithm, Molecular pump, Sickafus method, Compression ratio



۱. مقدمه

پمپ مولکولی تجهیزاتی دو سر باز مشتمل بر دو سیلندر هم‌محور 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 [۱]. پمپ مولکولی در بالای دستگاه سانتریفیوژ بین فضای روتور و محفظه نصب می‌شود و پس از تخلیه گازهای آن، نیروی پسا روی سطح بیرونی روتور کاهش می‌یابد و در نتیجه قدرت اصطکاک دستگاه کاهش می‌یابد. پمپ نوع هولوئیک یکی از انواع پمپ‌های مولکولی می‌باشد که در آن جابه‌جایی مولکول‌ها توسط یک سطح متحرک انجام می‌شود [۲]. ایده پمپ مولکولی، اولین بار توسط جائده^۱ در سال ۱۹۱۲ مطرح و توسعه یافت که شامل یک استوانه دوار با سرعت بالا درون یک محفظه ثابت بود [۳]. 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^۲ از ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۰ با ساده‌سازی 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 ۰/۱ تا ۱۰۰ ترسیم نمود [۴-۶]. در روش ساوادا ابتدا معادلات جریان لغزشی و سپس معادلات جریان مولکولی آزاد درون شیارهای پمپ مولکولار حل می‌شوند. نتایج نهایی از ترکیب جریان لغزشی و جریان مولکولی آزاد به دست می‌آید [۴]. اسکوردو^۳ الگوریتم عددی را برای شبیه‌سازی جریان مولکولی آزاد در پمپ هولوئیک براساس روش مونت‌کارلو توسعه داد. نتایج به دست آمده از این روش برای هندسه‌ای با سطح استوانه‌ای با چند شیار با در نظر گرفتن چرخش روتور با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده مطابقت خوبی داشت [۷]. در روش تحلیلی سیکافوس و همکاران سه عامل تأثیرگذار در ایجاد جریان در یک شیار پمپ هولوئیک در نظر گرفته شده است. مجموع سه جریان ناشی از "حرکت صفحات روتور در شیارها، گرادیان فشار و لقی بین روتور و شیارها" به عنوان جریان درون

یک شیار پمپ هولوئیک در نظر گرفته شده است [۸]. هم‌زمان با پیشرفت سیستم‌های محاسباتی روش‌های لاگرانژی از جمله روش DSMC توسعه پیدا کرده است [۹-۱۱]. در این روش به جای حل معادلات بولتزمن، از مفهوم فیزیکی به کار رفته در استخراج معادلات بولتزمن استفاده می‌گردد که برای محدوده وسیعی از رژیم‌های جریان کاربرد دارد. یک حل از روش DSMC با انتخاب تعداد مناسب شبکه و بازه زمانی و همچنین تعداد ذرات شبیه‌سازی بالا با حل معادلات بولتزمن برابری می‌کند [۹]. برد در سال ۱۹۹۴ جریان کوئ-تیلور را با روش شبیه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو مورد مطالعه قرار داد و تغییرات سرعت محوری، دما، تنش و شار حرارتی را در یک بعد بررسی کرد [۹]. همچنین رفتار ذرات گاز در داخل یک استوانه چرخان با روش DSMC مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۰-۱۳]. روش تحلیلی حل معادلات جریان با روش سیکافوس^۴ و همکاران با توجه به کاهش زمان محاسبات، بسیار مفید می‌باشد. با توجه به این که در روش سیکافوس، مقدار سرعت در نظر گرفته شده برای حرکت مولکول‌های گاز، برابر با سرعت روتور در نظر گرفته می‌شود، این روش برای روتورهای با سرعت پایین مناسب است. به همین دلیل یوسفی‌نسب و همکاران در سال ۲۰۲۰ با در نظر گرفتن مقدار دقیق سرعت رانشی مولکول‌های گاز درون شیارها، به یک رابطه با دقت بسیار بالاتر از روش سیکافوس دست یافتند که برای روتورهای با سرعت روتور بالا نیز بسیار مناسب بود [۱]. در مقاله حاضر با استفاده از چهار 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، یک ماشین در محدوده تعیین شده حاصل شده است. در واقع علت استفاده از چهار الگوریتم بهینه‌سازی رسیدن به شرایط بهینه (پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه) می‌باشد که در این شرایط، پمپ مولکولار بیشترین نسبت تراکم را خواهد داشت. نتایج الگوریتم‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. از بین الگوریتم‌های فراابتکاری الگوریتم نهنگ گوژ پشت بیشترین نسبت تراکم را داشت لذا انتخاب و سپس تکرارپذیری الگوریتم آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه پمپ مولکولار با پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه مذکور با روش تجربی مورد تست قرار گرفته است.

1. Gaede
2. Sawada
3. Skovorodko

4. Sickafus

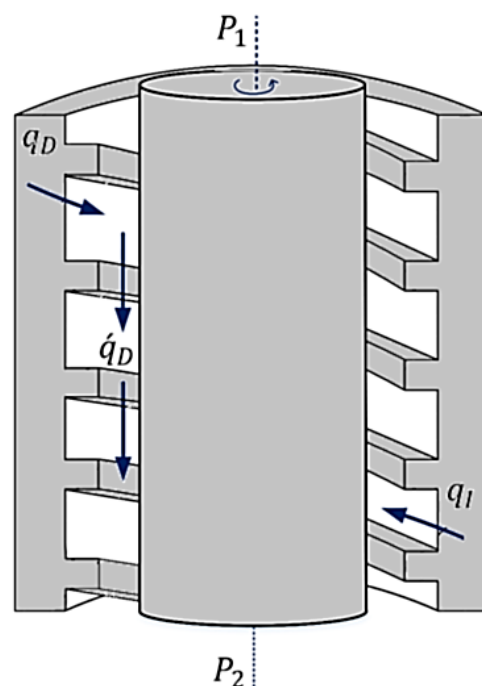


۲. تئوری روش

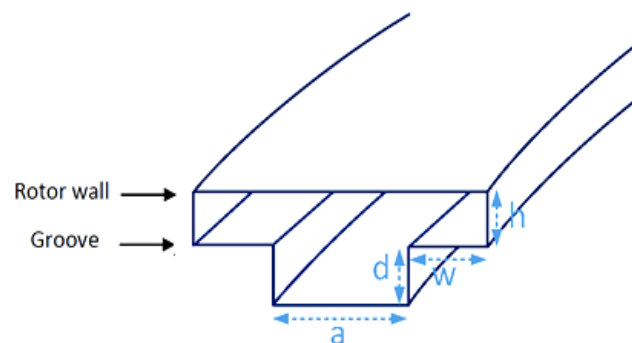
۱.۲ روش تحلیلی سیکافوس و همکاران

شکل ۱ پمپ مولکولار که در فضای بین روتور و بدنه یک ماشین سانتریفیوژ قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. در روش پیشنهادی توسط سیکافوس، 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 می‌شوند. این جریان‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

در شکل ۲ هندسه یک شیار در نظر گرفته شده برای پمپ مولکولار نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک جریان‌های مفروض در پمپ مولکولار.



شکل ۲. شماتیکی از یک شیار مستطیلی فرض شده توسط سیکافوس برای پمپ مولکولار.

دبی جرمی جریانی که به علت حرکت سطح روتور (A) در واحد عرض شیار ایجاد می‌شود با رابطه ۱ بیان شده است:

$$q_I = \rho \bar{V} A \quad (\text{gm/sec}) \quad (1)$$

در اینجا $\bar{V}$ متوسط سرعت رانش مولکول‌های گاز در اثر حرکت روتور در جهت طول شیار می‌باشد. از طرفی اگر رفتار گاز را ایدئال در نظر بگیریم، دبی جرمی بر واحد عرض شیار تحت تأثیر گرادیان فشار به صورت زیر تعیین می‌گردد:

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

در اینجا A مساحت شیار، C محیط شیار، M وزن مولکولی گاز، T دما، R ثابت جهانی گازها، P فشار و L طول اندازه‌گیری شده از شیار در جهت افزایش فشار می‌باشد. عاملی که باعث حرکت جریان در فضای بین شیارها می‌شود، جریان نفوذی محوری ($q_{D'}$) می‌باشد که در فضای بین روتور و پمپ مولکولار ایجاد شده است. به عبارت دیگر، با فرض این که 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. همچنین ϵ به صورت زیر محاسبه شده است.

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

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

در رابطه ۴، L طول شیارها در جهت محور عمود و L' فاصله بین دو شیارها در جهت عمود می‌باشد. از آنجایی که این دو جریان بین اختلاف فشار کل یکسانی صورت می‌گیرد بنابراین روابط زیر به دست می‌آید.

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

در رابطه فوق، h مقدار لقی (فاصله بین روتور و پمپ) و D قطر روتور، A' مساحت کل بین دو شیار و C' محیط بین دو شیار می‌باشد که به ترتیب با رابطه ۶ بیان می‌شود.

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



معادله ۱۲ رابطه‌ای ساده بدون نیاز به محاسبه سرعت پمپ (Q) می‌باشد. با جایگذاری α و β از رابطه ۹ و بازنویسی رابطه ۱۲، نسبت فشار نهایی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\ln\left(\frac{P_r}{P_1}\right)_{ult} = \frac{\gamma SVL \cos \theta}{(1+\epsilon) \sqrt{\frac{\gamma RT}{\pi M}} A} \quad (13)$$

که، θ زاویه بین شیار و محور روتور می‌باشد. معادله ۱۳ را می‌توان برحسب سرعت بدون بعد (η) که برابر است با نسبت سرعت خطی روتور (V_R) به میانگین سرعت حرارتی مولکول‌های گاز (V_0) به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\eta = \frac{V_R}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{\pi M}}} \quad (14)$$

$$\ln\left(\frac{P_r}{P_1}\right)_{ult} = \frac{\gamma S \eta L \cos \theta}{(1+\epsilon) A}$$

۲.۲ روش تحلیلی سیکافوس ارتقا یافته

از آنجایی که در روابط تحلیلی سیکافوس و همکاران، سرعت جریان گاز درون شیار با سرعت نزدیک دیواره روتور برابر در نظر گرفته شده و این مقدار با تقریب برابر با سرعت روتور در نظر گرفته شده است درحالی که مقدار سرعت مولکول‌های گاز درون شیار ضریبی از مقدار سرعت چرخشی روتور می‌باشد (به دلیل حاکم بودن رژیم جریان گذرا و کاملاً مولکولی در طول یک پمپ مولکولار)، لذا رابطه ۱۵ توسط یوسفی‌نسب و همکاران در سال ۲۰۲۰ جهت اصلاح رابطه فوق پیشنهاد شد [۱].

$$\eta = \frac{D_v V_R}{\sqrt{\frac{\gamma RT}{\pi M}}} \quad (15)$$

که D_v ضریب لغزش سرعت نام دارد و براساس شبیه‌سازی مولکولی شیار با روش DSMC به صورت رابطه ۱۶ تعیین می‌گردد [۱]:

$$D_v = (a_1 V_w + a_2) \left(a_3 + a_4 k + a_5 r + a_6 k^2 + a_7 k r + a_8 r^2 + a_9 k^2 + a_{10} k^2 r + a_{11} k r^2 \right) \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، k طول عمودی پمپ، V_w سرعت روتور و ثوابت a و r به صورت زیر تعریف شده است.

$$r = h + d \quad (17)$$

با جای‌گذاری رابطه ۵ در رابطه ۶ رابطه ۷ حاصل می‌شود.

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

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

$$Q = q_I + q_D + q_{D'} = q_I + (1+\epsilon) q_D = \frac{M}{RT} \bar{V} AP - (1+\epsilon) \frac{\lambda}{\gamma} \sqrt{\frac{\gamma M}{\pi RT}} \frac{A}{C} \frac{dP}{dL} \quad (8)$$

در رابطه فوق رفتار گاز، ایدئال فرض شده است. برای ساده‌سازی رابطه ۸ ضرایب زیر تعریف شده است.

$$\beta = \frac{\lambda}{\gamma} \sqrt{\frac{\gamma M}{\pi RT}} \frac{A}{C}$$

$$\alpha = A \bar{V} \frac{M}{RT} \quad (9)$$

$$Q = \alpha P - (1+\epsilon) \beta \frac{dP}{dL}$$

برای برقراری قانون بقای جرم می‌بایست Q مستقل از L باشد. اگر شیار یکنواخت باشد α و β ثابت خواهند بود. با انتگرال‌گیری از رابطه ۹ رابطه ۱۰ حاصل می‌شود.

$$P = \frac{Q}{\alpha} + \left(P_1 - \frac{Q}{\alpha} \right) \exp \frac{\alpha L}{(1+\epsilon) \beta} \quad (10)$$

جریان جرمی خالص (Q) را به صورت زیر نیز می‌توان بازنویسی کرد:

$$Q = \frac{\alpha \left[P_1 \exp \frac{\alpha L}{(1+\epsilon) \beta} - P_r \right]}{\left[\exp \frac{\alpha L}{(1+\epsilon) \beta} \right] - 1} \quad (11)$$

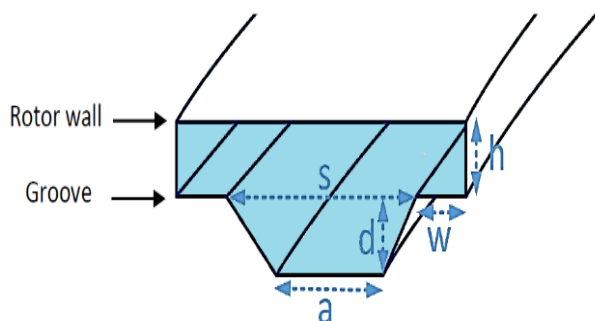
اگر فشار در $L=0$ و $L=1$ به ترتیب برابر با P_1 و P_r باشد، زمانی که $Q=0$ نسبت فشار نهایی به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\left(\frac{P_r}{P_1} \right)_{ult} = \exp \frac{\alpha L}{(1+\epsilon) \beta} \quad (12)$$

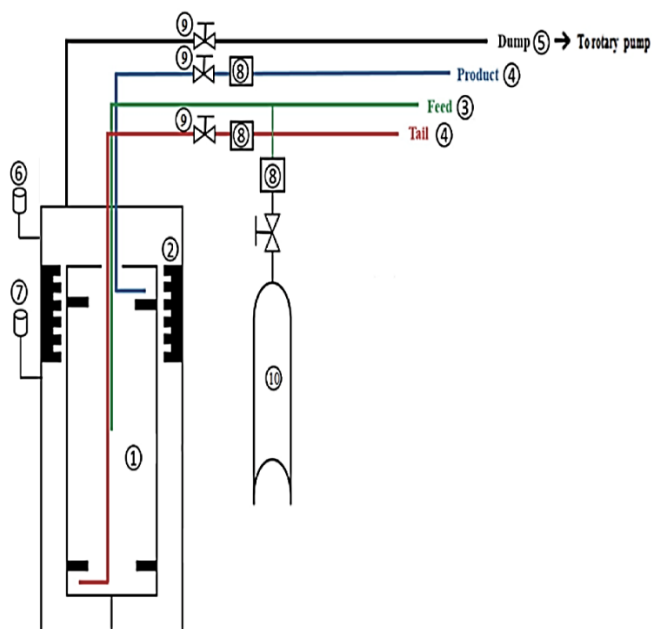


در فضای بالای پمپ مولکولار، (۷) فشارسنج جهت اندازه‌گیری خلأهای بالا در فضای پایین پمپ مولکولار، (۸) فلومتر برای اندازه‌گیری جریان، (۹) شیرهای کنترلی برای تنظیم جریان در مسیر لوله‌ها و (۱۰) مخزن گاز.

در ابتدا ایجاد خلأ در سانتریفیوژ به وسیله پمپ روتاری متصل به خط Dump با بستن شیرهای کنترلی خوراک، پسماند و محصول و باز کردن شیر کنترلی خط Dump توسط یک پمپ روتاری ایجاد می‌گردد. سپس با تزریق خوراک و باز کردن شیرهای کنترلی محصول و پسماند در ماشین سانتریفیوژ، فشار با استفاده از فشارسنج‌های تعبیه شده در بالا و پایین سانتریفیوژ ثبت می‌گردد و نسبت تراکم پمپ گزارش شده است [۱].



شکل ۳. هندسه یک شیر با سطح مقطع دوزنقه‌ای.



شکل ۴. شماتیک روش تجربی.

و

$$\begin{aligned} a_1 &= -0.01614 & a_7 &= 2.13 & a_8 &= 0.4524 \\ a_9 &= 1.222 & a_{10} &= -1.121 & a_{11} &= -0.7921 \\ a_{12} &= -1.754 & a_{13} &= 0.7154 & a_{14} &= -0.329 \\ a_{15} &= 1.307 & a_{16} &= 0.3511 & & \end{aligned} \quad (18)$$

شکل ۳ شماتیک سطح مقطع یک شیر دوزنقه‌ای شکل را نشان می‌دهد.

بازنویسی رابطه ۵ برای یک شیر با سطح دوزنقه‌ای، A و C به صورت زیر محاسبه شده است.

$$A = \frac{1}{2}(S+a)d$$

$$C = 2\sqrt{d^2 + \frac{(S-a)^2}{4}} + S + a = \sqrt{4d^2 + (S-a)^2} + S + a \quad (19)$$

با جای‌گذاری رابطه ۱۹ در روابط روش سیکافوس و همکاران و اصلاح رابطه ۱۴ با رابطه ۱۵ رابطه ۲۰ به دست می‌آید که این رابطه به نام رابطه سیکافوس ارتقا یافته برای یک شیر دوزنقه‌ای نام‌گذاری شده است.

$$\ln\left(\frac{P_r}{P_{ult}}\right) = \left[\frac{b'}{\frac{1}{2}(\lambda d + a) + \frac{h^2 \pi D (\sqrt{4d^2 + (\lambda d - a)^2} + \lambda d + a)}{2 \lambda L \cos \theta} + \frac{h^2 \pi D (\sqrt{4d^2 + (\lambda d - a)^2} + \lambda d + a)}{2 \lambda L \cos \theta} + \frac{g \lambda d}{\pi D \sin \theta} \cos \theta} \right]$$

$$b' = \frac{3}{4} \eta \quad (20)$$

در رابطه فوق، g و λ به ترتیب تعداد شیر و نسبت S به d می‌باشد.

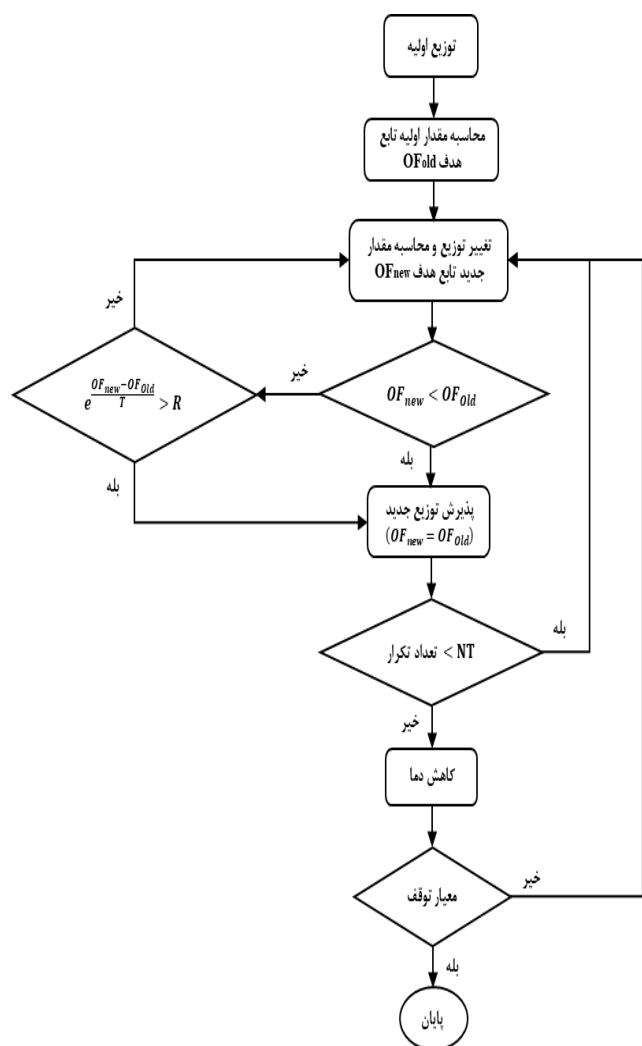
۳.۲ روش تجربی

جهت صحت‌سنجی نتایج مدل از تست تجربی انجام شده توسط یوسفی‌نسب و همکاران استفاده شده است [۱]. شماتیک تست تجربی حاضر در شکل ۴ نشان داده شده است. اجزای اصلی تجهیز عبارتند از: (۱) سانتریفیوژ گازی، (۲) پمپ مولکولی، (۳) لوله تزریق خوراک، (۴) لوله‌های خروج محصول و پسماند، (۵) لوله Dump جهت ایجاد خلأ داخل سانتریفیوژ گازی به وسیله پمپ روتاری، (۶) فشارسنج خلأ جهت اندازه‌گیری فشار



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم بهینه‌ساز شبیه‌سازی حرارتی (تبرید) را نشان می‌دهد.

در روش‌های 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 فراابتکاری 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 مناسب‌تری 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 [۱۴، ۱۵].



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم بهینه‌ساز شبیه‌سازی حرارتی.

۴.۲ الگوریتم‌های بهینه‌ساز فراابتکاری

۱.۴.۲ الگوریتم بهینه‌ساز شبیه‌سازی حرارتی^۱

شبیه‌سازی حرارتی یا به اختصار (SA) یک روش الهام گرفته از طبیعت و مبتنی بر احتمالات برای یافتن پاسخ بهینه در مسائلی با فضای جست‌وجوی بسیار بزرگ است. تلاش برای یافتن حالت‌های همسایه هر جواب یک بخش اساسی از الگوریتم بهینه‌سازی SA را تشکیل می‌دهد. دلیل اصلی این کار این است که جواب بهینه نهایی با انجام جست‌وجوهای متوالی در حالت‌های همسایه حالت تصادفی اولیه به دست خواهد آمد [۱۴].

مفهوم اصلی روش بهینه‌سازی تبرید از فرایند فیزیکی تبرید فلزات مذاب منشأ گرفته شده است. در فرایند تبرید یک فلز مذاب با دمای بسیار بالا به تدریج سرد می‌شود. در دماهای بالا، ساختار اتم‌های فلز به صورت تصادفی قرار گرفته‌اند بنابراین به آسانی می‌توانند نسبت به یکدیگر جابه‌جا شوند. با کاهش تدریجی دما، حرکت اتم‌ها کم می‌شود به طوری که اتم‌ها مرتب شده و تشکیل کریستال می‌دهند. اگر کاهش دما خیلی سریع صورت بگیرد ممکن است ساختار کریستالی تشکیل نشده و به جای آن ساختاری غیرکریستالی با سطح انرژی بالا تشکیل شود لذا جهت دستیابی به کمترین میزان سطح انرژی، فرایند سرد کردن می‌بایست به آرامی انجام شود. با استفاده از شبیه‌سازی فرایند تبرید ذکر شده، مقدار مینیمم مطلق یک تابع هدف مشخص می‌گردد. تابع هدف معادل سطحی از انرژی است که می‌بایست با استفاده از تغییرات بهینه‌کننده، مینیمم گردد. در این روش، فرایند سرد کردن با کنترل دما براساس تابع توزیع احتمالی بولتزمن شبیه‌سازی شده است. کاهش تدریجی دما معادل با تغییرات غیربهینه با یک احتمال معین است که با کاهش مقدار تابع هدف، کاهش می‌یابد.

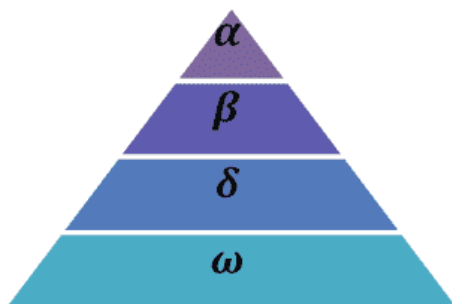
در روش بهینه‌ساز شبیه‌سازی حرارتی (تبرید) از توزیع احتمال بولتزمن، رابطه ۲۱ استفاده شده است که در آن، T ، E و k_b به ترتیب انرژی، دمای سیستم و ثابت بولتزمن می‌باشد. این توزیع بر این نکته تأکید می‌کند که وقتی یک سیستم در دمای T در تعادل گرمایی قرار دارد، یک توزیع انرژی دارد که در بین کل حالات مختلف انرژی توزیع شده است. همیشه امکان وجود یک دمای پایین با حالت انرژی سیستم بالا وجود دارد. لذا احتمال این که سیستم از یک مقدار انرژی مینیمم موضعی خارج شده و به یک مقدار مطلق هم‌گرا شود امکان‌پذیر است.

$$P(E) \propto \exp(-E/k_b T) \quad (21)$$

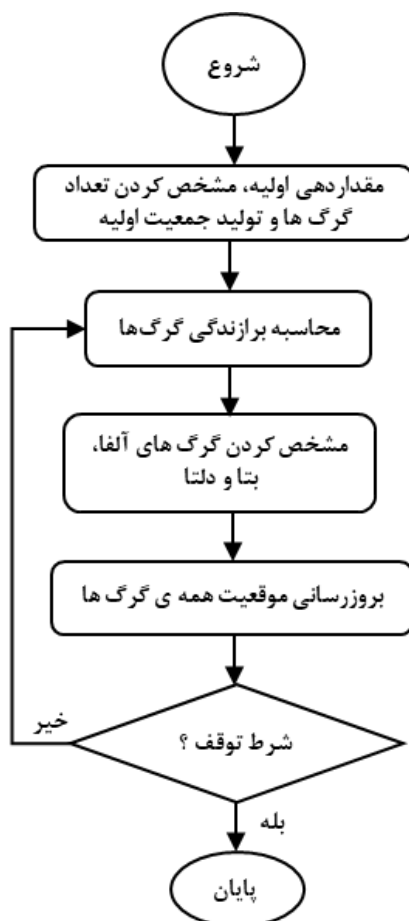
1. Simulated Annealing



موقعیت بهینه (محل احتمالی طعمه) 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. الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. ساختار هرمی سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری [۱۶].



شکل ۷. الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری.

۲.۴.۲. الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری^۱

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) توسط میرجلیلی و همکاران ایشان در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته‌جمعی آن‌ها ارائه شده است. گرگ خاکستری از خانواده گرگ‌های کشور کانادا است. سلسله مراتب ساختاری و رفتار گروهی گرگ‌های خاکستری به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

(۱) گرگ‌های خاکستری در بالای زنجیره غذایی قرار دارند و ترجیح می‌دهند به صورت گروهی زندگی کنند. به طور میانگین، تعداد اعضای گروه‌های آن‌ها ۵-۱۲ عدد است. هر گله از چهار رتبه اصلی تشکیل شده است.

(۲) رهبر گرگ‌های گروه، آلفا (alpha) نام‌گذاری می‌شود که بر گروه مسلط بوده و مواردی مانند محل استراحت و شیوه شکار را مدیریت می‌کنند. همچنین نوعی ساختار دموکراتیک در گروه دیده شده است.

(۳) گرگ‌های بتا (beta) به گرگ‌های آلفا در فرایند تصمیم‌گیری کمک کرده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن‌ها می‌باشند.

(۴) گرگ‌های دلتا (delta) پایین‌تر از گرگ‌های بتا بوده و شامل گرگ‌های پیر، گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادها و شکارچی‌ها می‌باشند.

(۵) گرگ‌های امگا (omega) در هرم سلسله مراتب، پایین‌ترین سطح را داشته و از کمترین حق برخورداری می‌باشند. در تصمیم‌گیری مشارکت ندارند و بعد از همه غذا می‌خورند. در شکل ۶ هرم سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری نشان داده شده است.

طبق بررسی‌های صورت گرفته توسط مورو و همکاران^۲ مراحل اصلی شکار کردن گرگ‌های خاکستری از سه مرحله اصلی تشکیل شده است:

الف) مشاهده، ردیابی و تعقیب شکار
ب) نزدیک شدن، حلقه زدن به دور شکار و گمراه کردن شکار تا زمانی که از حرکت بایستد.
ج) حمله کردن به شکار

بهینه‌سازی با کمک گرگ‌های آلفا، دلتا و بتا صورت می‌گیرد. گرگ آلفا رهبری را به عهده گرفته و گرگ بتا و دلتا نیز با آن مشارکت دارند و بقیه گرگ‌ها به عنوان دنبال‌کننده آن‌ها محسوب می‌شوند. به عبارت دیگر در الگوریتم گرگ خاکستری فرض می‌شود که در هر زمان، دقیق‌ترین اطلاع از

1. Grey Wolf

2. Muro et al.



دانه‌ها بیشتر حول جواب‌های به دست آمده تولید می‌شود و پراکندگی کمتری نسبت به شروع الگوریتم دارند.

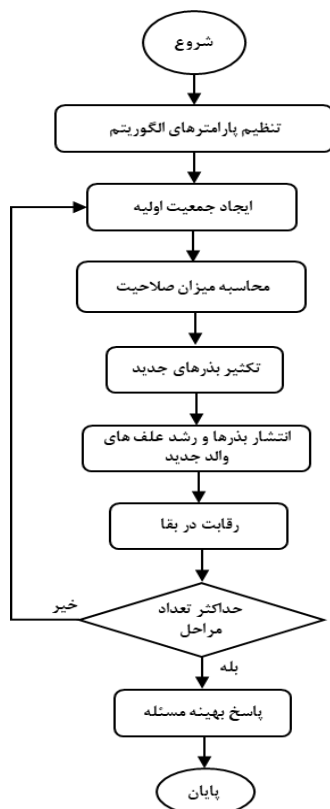
$$\sigma_{iter_i} = \left(\frac{\max_iter - iter_i}{\max_iter} \right)^n (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (23)$$

که در آن، $\max_iter$ بیشترین تعداد دفعات تکرار الگوریتم، $iter_i$ تکرار i ام الگوریتم، n ضریب غیرخطی و $iter$ مقدار انحراف معیار تکرار i ام الگوریتم می‌باشد.

پ) ادامه حیات علف‌های با مطلوبیت بیشتر (حذف رقابتی).

اگر یک علف تولیدمثل نداشته باشد از بین خواهد رفت. بنابراین به یک رقابت بین علف‌ها برای محدود کردن حداکثر تعداد علف‌ها نیاز است. با توجه به این‌که بعد از چند مرحله از تکرار الگوریتم، تعداد دانه‌ها در اثر تولیدمثل زیاد می‌شوند؛ لذا باید مکانیزمی برای کنترل تعداد کل دانه‌ها در الگوریتم تعریف شود. با رسیدن به تعداد ماکزیمم دانه‌های مجاز (P_{max}) باید دانه‌های ضعیف حذف شوند به نحوی که جمعیت دانه‌ها همان حد ماکزیمم (P_{max}) بماند.

ت) ادامه فرایند تا رسیدن به گیاهان با بهترین مطلوبیت با چک کردن شرایط خاتمه الگوریتم [۱۷، ۱۸]. فلوچارت الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم (IWO) در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. فلوچارت الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم.

۳.۴.۲ الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز^۱

الگوریتم بهینه‌ساز علف هرز (IWO) با الهام از تکثیر و رشد علف‌های هرز با الهام گرفتن از طبیعت توسط محرابیان و لوکاس معرفی شده است [۱۷]. طبق تعریف، علف‌های هرز به گیاهانی ناخواسته اطلاق می‌شود که دارای رفتار تهاجمی برای رشد بوده و به عنوان تهدیدی برای دیگر گیاهان زراعی مفید می‌باشند و جلوی رشد آن‌ها را می‌گیرند. این الگوریتم درعین سادگی، در یافتن نقاط بهینه بسیار مؤثر و سریع می‌باشد. در واقع این الگوریتم براساس ویژگی‌های طبیعی علف‌های هرز مانند تولید بذر، رشد و تنازع برای بقا عمل می‌کند. جزییات گام‌های الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

الف) تولید جمعیت تصادفی اولیه (پخش دانه‌ها) در فضای مورد نظر و ارزیابی تابع هدف آن‌ها یک جمعیت اولیه در فضای حل مسئله به صورت تصادفی پراکنده و سپس ارزیابی می‌شوند.

ب) تولیدمثل بر مبنای شایستگی و به روزرسانی انحراف معیار (پراکندگی محیطی).

هر عضو از جمعیت برطبق توانایی‌اش می‌تواند براساس کمترین و بیشترین شایستگی بین دو مقدار تعیین شده، تولید دانه کند. تعداد دانه‌هایی که هر گیاه می‌تواند تولید کند به طور خطی از کمترین تعداد دانه ممکن تا بیشترین تعداد (S_{min} , S_{max}) ممکن تغییر می‌کند. نحوه محاسبه تعداد دانه‌های تولیدی در اطراف هر علف طبق رابطه ۲۲ می‌باشد:

$$Seed_i = Round \left\{ S_{min} + (S_{max} - S_{min}) \times \frac{N_{weed} - rank_i}{N_{weed} - 1} \right\} \quad (22)$$

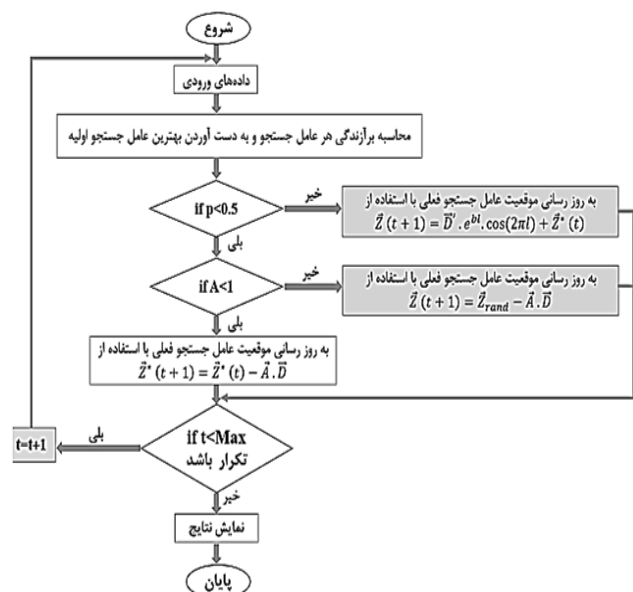
که در آن، $rank_i$ رتبه علف i ام، $Round$ تابع گرد کردن اعداد، N_{weed} تعداد علف‌های اولیه، S_{max} ماکزیمم دانه‌های قابل تولید در اطراف هر علف، S_{min} مینیمم دانه‌های قابل تولید در اطراف هر علف و $Seed_i$ تعداد دانه‌های تولیدی در اطراف علف i ام می‌باشد. دانه‌های تولید شده در فضای جستجو در این مرحله به طور تصادفی با توزیع نرمال (با میانگین صفر و واریانس از پیش تعیین شده می‌باشد) در فضای مسئله پخش می‌شوند: یعنی دانه‌ها نزدیک به والدشان (علف‌ها) توزیع می‌شوند. مقدار انحراف معیار (σ_{iter}) در هر مرحله از تکرار الگوریتم؛ از مقدار اولیه تعریف شده ($\sigma_{initial}$) تا مقداری نهایی تعریف شده (σ_{final}) به صورت غیرخطی طبق رابطه ۲۳ کاهش می‌یابد. یعنی هرچه به انتهای کار الگوریتم نزدیک می‌شویم

1. Invasive Weed Optimization



۵.۴.۲ الگوریتم بهینه‌ساز نهنگ گوژ پشت^۱

یکی از بزرگ‌بالاترین نهنگ‌ها، نهنگ گوژ پشت است. نهنگ‌های گوژ پشت ترجیح می‌دهند تا دسته‌ای از 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 گوژپشت می‌توانند مکان شکار را شناسایی کرده و آن‌ها را محاصره کنند [۱۹]. 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 این که بهترین عامل جستجو شناسایی شد، عوامل دیگر جستجو سعی می‌کنند تا مکان خود را نسبت به بهترین عامل جستجو، به‌روزرسانی 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 به‌روزرسانی شود [۱۹]. در روش شکار نهنگ‌های گوژ پشت که مبتنی بر تولید حباب جهت محاصره طعمه می‌باشد مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. در این روش دسته‌ای از ماهی‌های کوچک که به سطح آب کشیده می‌شوند توسط نهنگ‌های گوژ پشت شکار می‌شوند. الگوریتم ریاضی بهینه‌سازی نهنگ‌های گوژ پشت براساس استراتژی شکار حباب خالص است. الگوریتم بهینه‌ساز نهنگ گوژ پشت در شکل ۹ مشاهده می‌گردد.



شکل ۹. الگوریتم بهینه‌ساز نهنگ گوژ پشت [۱۹].

$\vec{D}$ به فاصله $\vec{X}$ از نهنگ تا طعمه اشاره دارد و از رابطه ۲۴ و ۲۵ به دست می‌آید. b ثابتی برای تعریف مارپیچی لگاریتمی، l عدد تصادفی بین $+1$ و -1 و P عددی تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. همچنین A با مقادیر تصادفی بین -1 تا $+1$ نشانگر نزدیکی عامل جستجو به نهنگ گوژ پشت مرجع می‌باشد.

$$\vec{D} = \left| C \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}(t) \right| \quad (24)$$

$$\vec{X}(t+1) = \left| \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \right| \quad (25)$$

که $\vec{X}_{rand}$ بردار موقعیت تصادفی منتخب از جمعیت جاری می‌باشد و بردار $\vec{A}$ مقادیر تصادفی بزرگتر از $+1$ و یا کوچکتر از -1 مورد استفاده قرار می‌گیرد تا عامل جستجو مجبور به دور شدن از نهنگ گوژ پشت مرجع شود. جهت به‌روزرسانی موقعیت عامل در جهت جستجوی طعمه، به جای استفاده از بهترین عامل جستجو از انتخاب تصادفی عامل مورد استفاده قرار گرفته شده است. به عبارت دیگر اگر مقادیر قدرمطلق A کوچکتر از ۱ باشد الگوریتم در فاز حمله قرار گرفته و نهنگ‌ها طعمه را محاصره کرده و در آن هنگام نهنگ‌ها (عامل جستجو) موقعیت خود را نسبت به بهترین عامل جستجو به‌روزرسانی می‌کنند. در صورتی که قدرمطلق A بزرگتر یا مساوی ۱ باشد الگوریتم در فاز جستجو قرار گرفته و نهنگ‌های گوژ پشت در جستجوی طعمه از یکدیگر دور می‌شوند [۱۹].

دو مسئله 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 چهار روش در نحوه رسیدن به نقطه بهینه و زمان رسیدن به آن می‌باشد.

۵.۲ تابع هدف و قید بهینه‌سازی

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. هیچ‌گونه قیدی برای پمپ مولکولار وجود ندارد. نسبت لگاریتم تراکم برای g شیار به صورت رابطه ۲۶ حاصل شده است [۱].

1. Whalf Algorithm



دامنه تغییرات پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار در جدول ۱ بیان شده است.

با استفاده از چهار الگوریتم فراابتکاری، مقادیر بهینه برای مهم‌ترین پارامترهای هندسی و عملیاتی: زاویه شیار، لقی، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار محاسبه شده است. نتایج بهینه این پارامترها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در جدول ۲ بیان شده است.

الگوریتم فراابتکاری WOA با توجه به نسبت لگاریتم نسبت تراکم ۴/۹ 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 تکرارپذیری در ۵ بار اجرا در جدول ۳ بیان شده است.

جهت صحت‌سنجی نسبت تراکم حاصل از پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه پمپ مولکولار با الگوریتم فراابتکاری WOA، پمپ مولکولار با شرایط هندسی و عملیاتی فوق ساخته و مورد تست قرار گرفت. نتایج تست در جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۱. متغیرهای بهینه‌سازی و محدوده تغییرات آن‌ها

کمیت	حد پایین	حد بالا
عرض بالای شیار (mm)	۳	۷
عرض پایین شیار (mm)	۴	۱۲
عمق شیار (mm)	۲	۷
فاصله لقی (mm)	۱	۲
طول پمپ (mm)	۷۵	۱۰۵
دما (K)	۳۰۰	۳۳۰
زاویه شیار با محور عمود (درجه)	۱۵	۳۰
تعداد شیار	۱۶	۳۰

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

$$b' = \frac{3}{4} \eta \quad (26)$$

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

۶.۲ مقایسه نتایج مدل

ارزیابی مدل و داده‌های تجربی در محاسبات انجام شده برای ارزیابی انحراف داده تجربی با داده پیش‌بینی شده توسط مدل از انحراف متوسط مطلق به صورت زیر استفاده شده است:

$$AAD = \frac{1}{n} \sum \left| \ln\left(\frac{P_T}{P_B}\right)_{exp.} - \ln\left(\frac{P_T}{P_B}\right)_{model} \right| \quad (27)$$

اگر مقدار $AAD \leq 5$ باشد، داده مدل با نتایج تجربی مطابقت بسیار خوبی دارد. اگر $5 \leq AAD \leq 10$ داده مدل با نتایج تجربی مطابقت نسبتاً خوبی دارد و اگر $AAD \geq 10$ داده مدل با نتایج تجربی مطابقت ندارد [۲۰].

۳. نتایج

جهت تعیین مقادیر بهینه پارامترهای هندسی و عملیاتی به منظور رسیدن به بیشترین نسبت تراکم از چهار الگوریتم فراابتکاری DA ، GWO ، IWO و WOA استفاده شده است.

جدول ۲. پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه پمپ مولکولار با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

لگاریتم نسبت تراکم	تعداد شیار	زاویه شیار با محور افق	دما (k)	طول پمپ (mm)	لقی (mm)	عمق شیار (mm)	عرض پایین شیار (mm)	عرض بالای شیار (mm)	نوع الگوریتم
۳/۹	۲۳	۲۰/۷۸	۳۰۰	۱۰۵	۱/۳۵	۳/۲	۶/۶	۶/۵	DA
۴/۱	۲۳	۲۰/۲	۳۱۵	۱۰۵	۱/۳	۳/۵	۶/۳۳	۶/۳	GWO
۴/۴	۲۳	۲۰/۱۷	۳۰۵	۱۰۵	۱/۲۵	۴	۶/۴۵	۶/۵	IWO
۴/۹	۲۴	۲۱	۳۱۰	۱۰۵	۱/۲	۳/۵	۶/۲۵	۶	WOA



جدول ۳. پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری WOA در تکرارهای مختلف

تعداد شیار	زاویه شیار با محور افقی	دما (k)	طول پمپ (mm)	لقی (mm)	عمق شیار (mm)	عرض پایین شیار (mm)	عرض بالای شیار (mm)	تکرار
۲۴	۲۱	۳۱۰	۱۰۵	۱٫۲	۳٫۵	۶٫۲۵	۶	۱
۲۴	۲۱	۳۱۱	۱۰۵	۱٫۲	۳٫۵	۶٫۳۰	۶	۲
۲۴	۲۱	۳۱۰	۱۰۵	۱٫۲	۳٫۵	۶٫۲۶	۶	۳
۲۴	۲۱	۳۱۰	۱۰۵	۱٫۲	۳٫۵	۶٫۲۸	۶	۴
۲۴	۲۱	۳۱۰	۱۰۵	۱٫۲	۳٫۵	۶٫۲۵	۶	۵

مراجع

1. Yousefi-Nasab S, Safdari J, Karimi-Sabet J, Khajenoori M. Prediction of the compression ratio of a Holweck-type molecular pump with the presence of multi-component gases using a modified Sickafus method for high-speed rotors. *Vacuum*. 2020;172: 109056.
2. Holweck F. Pompe Moleculaire Helicoidale. *C. R. Acad. Sci.* 1923;43:177.
3. Gaede W. Die molekularluftpumpe. *Annalen der Physik*. 1913;346(7):337-380.
4. Sawada T. Rarefied gas flow in a rectangular groove facing a moving wall. *Sci. Papers*. 1976;70(4):79-86.
5. Sawada T, Taniguchi O. The Axial Flow Molecular Pump. *Bull. JSME*. 1973;16(92):312-318.
6. Sugiyama W, Sawada T. Pumping mechanism of helical grooved molecular drag pumps. *Journal of vacuum science & technology*. 1999;17(4):2069-2074.
7. Skovorodko P.A. Free molecular flow in the Holweck pump. *In AIP Conference Proceedings*. 2001;585.
8. Sickafus E.N, Nelson R.B, Lowry R.A. The holweck type molecular pump. *university of virginia. Report* no. EP-4422-178-61U. 1961.
9. Bird G. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. *Oxford University Press. New York, Oxford University Press*. 1994.
10. Khajenoori M, Safdari J, Haghighi Asl A, Norouzi A. Modeling gas-granular flow in molecular using the DSMC method and continuum regions by Onsager's pancake equation with mass sources and sinks in a rotating cylinder. *Granular Matter*. 2019;21:1-15.
11. Khajenoori M, Haghighi Asl A, Safdari J, Norouzi A. Modeling and simulating of feed flow in a gas centrifuge using the Monte Carlo method to calculate the maximum separation power. *Journal of Molecular Modeling*. 2019;25:1-12.

جدول ۴. لگاریتم نسبت تراکم پمپ مولکولار به دست آمده با پارامترهای

بهینه شده با روش سیکافوس ارتقا یافته و تجربی

روش	$\ln(P_T / P_B)$
سیکافوس ارتقا یافته	۴٫۹
تجربی	۴٫۲

مقدار انحراف متوسط مطلق (AAD) لگاریتم نسبت تراکم فشار با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل سیکافوس ارتقا یافته با پارامترهای بهینه، برابر با ۰٫۷ می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب روش تجربی و روش سیکافوس ارتقا یافته با پارامترهای هندسی و عملیاتی بهینه با الگوریتم فراابتکاری WOA می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

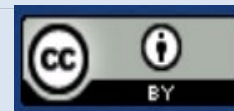
در مقاله حاضر ابتدا عملکرد یک پمپ مولکولار با استفاده از چهار الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، مقادیر بهینه برای پارامترهای هندسی و عملیاتی پمپ مولکولار: لقی پمپ، زاویه شیار، عمق شیار، تعداد شیار، دمای گاز، عرض پایین و بالای شیار، برای ماشین فرضی استخراج گردید. نتایج نشان داد در بین الگوریتم‌های فراابتکاری، با پارامترهای بهینه شده با الگوریتم نهنگ گوژ پشت بیشترین نسبت تراکم حاصل می‌گردد. سپس تکرارپذیری الگوریتم نهنگ گوژ پشت مورد بررسی قرار گرفت سپس با روش تجربی پمپ مولکولار مذکور مورد تست قرار گرفت و نسبت تراکم آن برابر با ۴٫۲ شد. مقدار انحراف متوسط مطلق لگاریتم نسبت تراکم فشار با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل سیکافوس ارتقا یافته با پارامترهای بهینه، نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب روش تجربی و روش سیکافوس ارتقا یافته با الگوریتم فراابتکاری WOA می‌باشد.



12. Khajenoori M, Haghighi Asl A, Safdari J, Norouzi A. Investigation of hydrodynamic parameters inside a gas centrifuge rotor in the presence of hydrogen fluoride and air light gases using DSMC and Boltzmann distribution function. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2021;94:118-127.
13. Khajenoori M, Safdari J, Haghighi Asl A, Norouzi A. Modeling and simulation of the gas behavior in a gas centrifuge rotor in the presence of hydrogen fluoride light gas by DSMC and Onsager-pancake. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022;98:44-53.
14. Kirkpatrick S, Gelatt C.D, Vecchi M.P. Optimization by simulated annealing. *Science*. 1989;220:671-680.
15. Aarts E, Korst J.H.M. Simulated annealing and Boltzmann machines. *Wiley. New York*. 1989.
16. Mirjalili S.A, Mirjalili S.M, Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 2014;69:46-61.
17. Mehrabian A.R, Caro L. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecol. Inform*. 2006;1:355-366.
18. Khajenoori M, Safdari J, Yousefi-Nasab S, Mallah M.H, Karimi-Sabet J, Askari M.H. Optimization of a conical cascade using invasive weed optimization (IWO) algorithm for multi-component systems: Investigation of the effect of feed flow on the separation factor of centrifuge machines in the cascade by DSMC method. *Annals of Nuclear Energy*. 2021;162:108497.
19. Mirjalili S.A, Lewis A. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2016;95:51-67.
20. Ghoreishi S.M, Gholami Shahrestani R. Subcritical water extraction of mannitol from olive leaves. *Journal of Food Engineering*. 2009;93(4):474-481.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

خواجه‌نوری، مسعود، یوسفی‌نسب، صادق، صفدری، سیدجابر، باصیری، صبا. (۱۴۰۴)، بهینه‌سازی پمپ مولکولار با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری: روش سیکافوس ارتقا یافته. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۱۲(۲)، ۱۴۸-۱۵۹. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1604.2038>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1678.html

