



Kinematic Optimization of the Stirling engine for Maximum Output Work and Constraint of Occupied Space

A. Rahmati, S. M. Varedi-Koulaei, H. Ahmadi, M. H. Ahmadi

Faculty of Mechanical And Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

ABSTRACT: The Stirling engine has attracted researchers' attention in recent years due to some advantages such as low noise, external combustion, and the ability to use solar and other new energy sources. Moreover, these engines can also be used in applications with low or high-temperature differences. The type of cylinders, their arrangement, and the transmission mechanism can affect this engine's performance. On the other hand, engineers and designers are always looking to increase the efficiency and effectiveness of mechanical systems, which in engines can lead to increasing the engine's work or power. In the current study, firstly, the dimensional analysis of different types of Stirling engines is done. Then, by defining the engine's geometric parameters as the design variables, the engine's output work will be maximized using optimization algorithms. Also, in order to prevent the increase of the dimensions of the engine and its occupied space, a new constraint in the problem will be used. Kinematic optimization is applied to four different types of Stirling engines. Three algorithms, namely genetic algorithm, particle swarm optimization, and imperialistic competition algorithm, have been used to solve the optimization problem. The results of kinematic optimization show that the output work of the engine with optimal dimensions has increased approximately 1.45 to 4.59 times.

Review History:

Received: Aug. 05, 2020
Revised: Nov. 05, 2020
Accepted: Dec. 24, 2020
Available Online: Dec. 30, 2020

Keywords:

Stirling engine
Kinematic
Thermodynamic
Optimization algorithms
Output work

1. INTRODUCTION

The Stirling engine is a closed-loop external combustion engine that its operating fluid never leaves the cylinders of the engine. This engine can be used in cases where a low-noise engine such as submarine is needed because it generates very low volume sound density [1, 2].

In this study, the four well-known layouts of the Stirling engine (Fig. 1) are considered, and the thermodynamic relations, Schmidt's theory, and the kinematic relations are also regarded. As the outputs of the current study, pressure, volume, the output work of the engine, and the effect of the link's length on the output power of the engine are also investigated. All the geometric parameters of each layout of the Stirling engine are considered as the design variables. Also, in order to prevent the increase of the dimensions of the engine and its occupied space, a new constraint in the problem will be used. Kinematic optimization is applied to four different types of Stirling engines, where three algorithms, namely GA, PSO, and ICA, have been used to solve the optimization problem.

2. KINEMATIC MODELING

Using the governing kinematic relationships of each layout, the compression volume (V_c) and the expansion volume (V_e) can be calculated. If the values of pressure and volume relative to the rotation angle are known, the equation

*Corresponding author's email: varedi@shahroodut.ac.ir

of fluid pressure variations as a function of volume changes would be yielded. Given this relation, the pressure diagram in terms of the volume of the engine and the output of the engine, which is actually the area of the enclosure, can be calculated. Fig. 1 shows the geometry of the mechanisms for four different layouts of the Stirling engine, namely [3]:

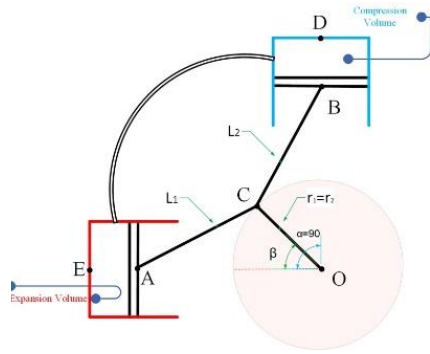
- α type with slider-crank linkage
- β type with slider-crank linkage
- γ type with slider-crank linkage
- α type with Ross-Yoke mechanism

3. OPTIMIZATION

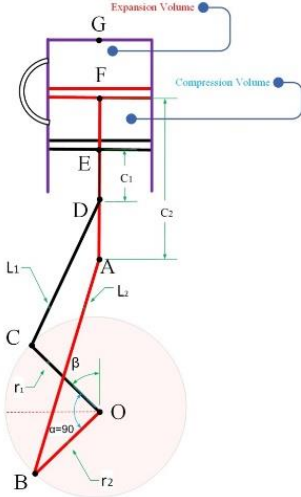
The output work for each layout depends on the pressure and volume. Indeed, the pressure and volume equations depend on the length of the links and the radius of the cylinders. Therefore, the variation in the output work is the function of the links length and the radius of the cylinders. The output can be maximized by considering the length of the links as well as the radius of each cylinder as design parameters and by performing optimization algorithms. Then the maximum output work can be simply achieved by using evolutionary algorithms that are used in many practical engineering problems.

Moreover, a constraint is used to prevent the engine size is increased. The optimization problem will be summarized as follows:

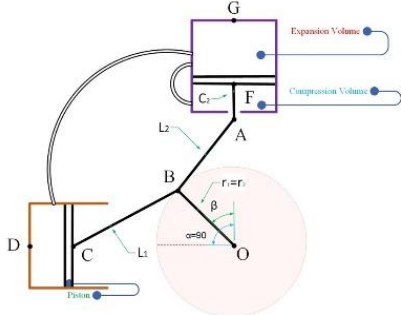




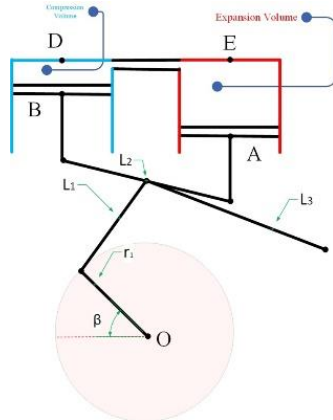
a) α type with slider-crank linkage



b) β type with slider-crank linkage



c) γ type with slider-crank linkage



d) α type with Ross-Yoke mechanism

Fig. 1. Geometry of the mechanisms for different layouts [3]

Table 1. The permissible ranges of the problem constraints

Engine type	P_{min} (kPa)	P_{max} (kPa)	OS_{max} (cm ³)
α _SC	180	1200	301.59
β _SC	150	700	257.61
γ _SC	250	600	383.27
α _RY	150	3000	1097.82

Table 2. The optimization results

Engine	Optimal W	GA	PSO	ICA
α	W (kg (cm/s) ²)	31022	31754	31227
SC	W / W_0	2.04	2.09	2.05
β	W (kg (cm/s) ²)	11024	11702	10652
SC	W / W_0	1.5	1.59	1.45
γ	W (kg (cm/s) ²)	29658	30974	27036
SC	W / W_0	2.48	2.59	2.26
α	W (kg (cm/s) ²)	102071	100996	101249
RY	W / W_0	4.59	4.54	4.55

$$Max F = W$$

$$s.t.: P_{min} \leq P \leq P_{max}$$

$$OS \leq OS_{max} \tag{1}$$

$$x_{min} < x_i < x_{max} \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

where W is the output work and x is the vector of the design variables. The list of the design variables and their permissible variations are taken from [3]. OS is the occupied space for each layout, considered based on the following relations:

$$OS_{\alpha_sc} = (2\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, C_r)) + (\pi E_r^2 (OE - r_1)) + (\pi C_r^2 (OD - r_1)) \tag{2}$$

$$OS_{\beta_sc} = (2\pi r_1^2 E_r) + (\pi E_r^2 (OG - r_1)) + (\pi D_r^2 (OD - r_1)) \tag{3}$$

$$OS_{\gamma_sc} = (2\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, D_r)) + (\pi E_r^2 (OG - r_1)) + (\pi D_r^2 (OG - r_1)) \tag{4}$$

$$OS_{\alpha_ry} = (\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, C_r)) + (2 \cdot \min(E_r, C_r) \cdot \max(2r_1, 2l_2)(r_1 + l_1)) + (\pi E_r^2 (OE - l_1 + r_1)) + (\pi C_r^2 (OE - l_1 + r_1)) \tag{5}$$

Moreover, the values of the P_{min} , P_{max} , and OS_{max} are represented in Table 1.

4. RESULTS

The optimization results of the different layouts are demonstrated in Table 2. In this Table, the value of W_0 in each case is extracted from [2]. Furthermore, the P-V diagram for the original and optimal engines, using different algorithms are shown in Figs. 2 to 4, respectively.

A comparison between the three optimization methods for the four different Stirling engines is shown in Fig.5.

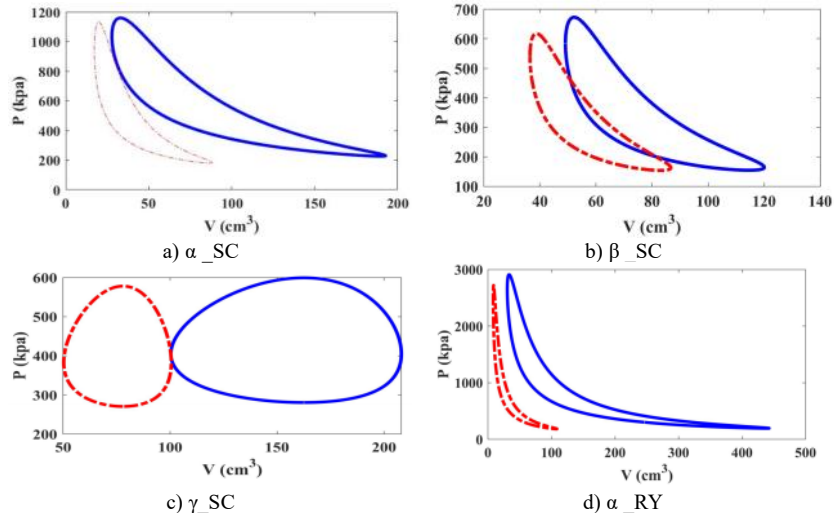


Fig. 2. Result of the GA algorithm for different layouts

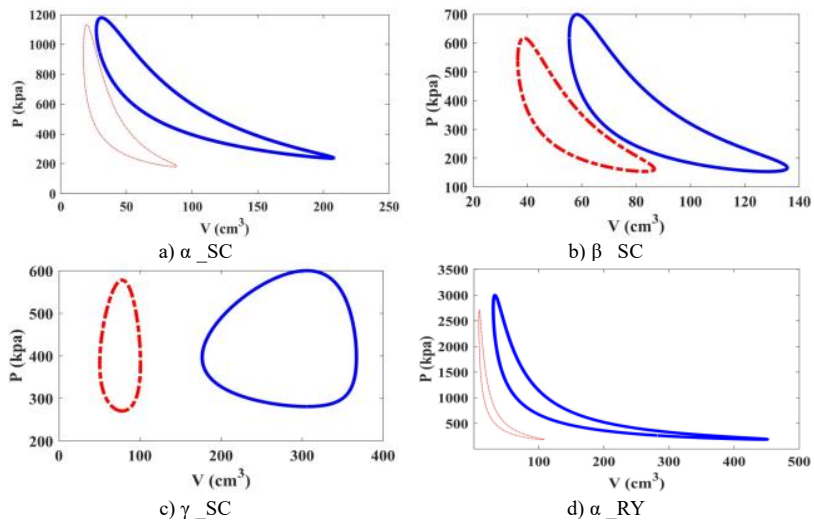


Fig. 3. Result of the PSO algorithm for different layouts

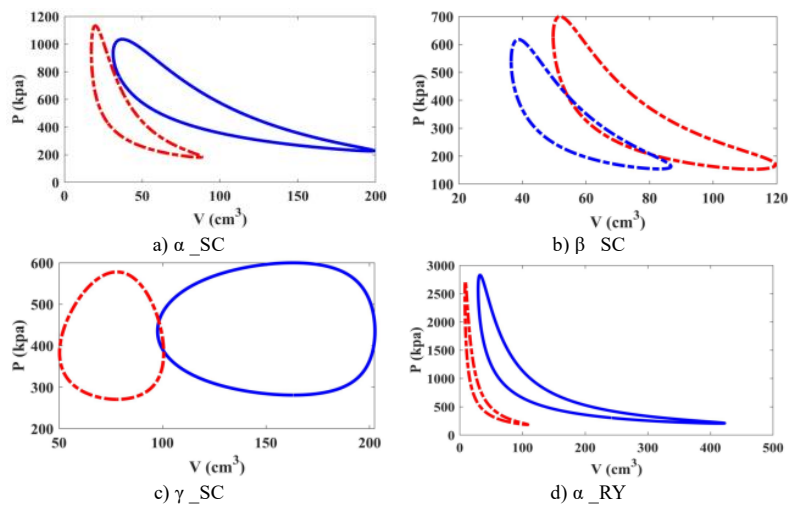


Fig. 4. Result of the ICA algorithm for different layouts

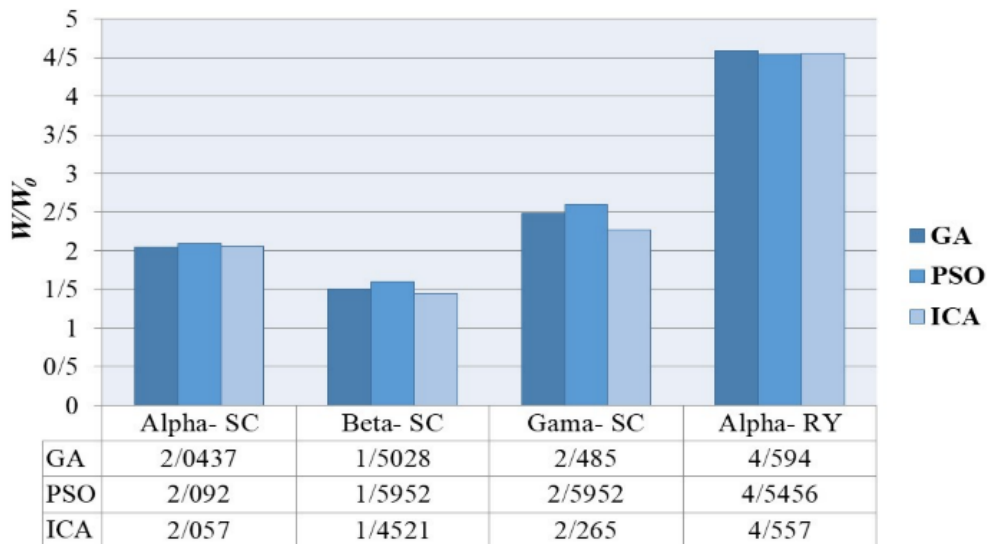


Fig. 5. Comparison between three optimization algorithms

5. CONCLUSIONS

In the current study, the dimensional synthesis of the Stirling engine is considered based on four different layouts. This optimization problem's design variables included the mechanism's geometric parameters, and the engine's occupied space is considered the main constraint. The optimization aimed to increase the output work of the engine. This optimization problem is solved for different layouts using three optimization algorithms GA, PSO, and ICA. The results show:

- Irrespective of other parameters, increasing the length of the crankshaft leads to higher output work.
- Regardless of the effect of other parameters, increasing the connecting rod's length leads to lower output work.
- Alpha type Stirling engine with Ross-Yoke mechanism has the best result compared to other layouts; for maximizing the output work based on optimizing the geometric parameters.

- In comparison between optimization techniques, the PSO method had the best results in three cases and in one case, the GA method had the best results.

REFERENCES

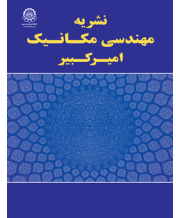
- [1] M.H. Ahmadi, A.H. Mohammadi, S. Dehghani, Evaluation of the maximized power of a regenerative endoreversible Stirling cycle using the thermodynamic analysis, *Energy Conversion and Management*, 76 (2013) 561-570.
- [2] J. Egas, D.M. Clucas, Stirling engine conFIGuration selection, *Energies*, 11(3) (2018) 584.
- [3] A. Rahmati, S. Varedi-Koulaei, M. Ahmadi, H. Ahmadi, Dimensional synthesis of the Stirling engine based on optimizing the output work by evolutionary algorithms, *Energy Reports*, 6 (2020) 1468-1486.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Rahmati, S.M. Varedi-Koulaei, H. Ahmadi, M.H. Ahmadi, *Kinematic Optimization of the Stirling engine for Maximum Output Work and Constraint of Occupied Space*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(7) (2021) 1053-1056.

DOI: [10.22060/mej.2020.18822.6900](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18822.6900)





بهینه‌سازی سینماتیکی موتور استرلینگ بر اساس افزایش کار خروجی و با در نظر گرفتن فضای اشغالی موتور

عباس رحمتی، سیدمجتبی واردی کولائی*، حبیب احمدی، محمدحسین احمدی

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

کلمات کلیدی:

موتور استرلینگ
سینماتیک
ترمودینامیک
روش‌های بهینه‌سازی
کار خروجی

خلاصه: موتور استرلینگ به دلیل برخی مزایا از جمله سروصدای کم، احتراق خارجی بودن و توانایی استفاده از انرژی خورشیدی و دیگر انرژی‌های نوین، توجه پژوهشگران را در سال‌های اخیر به خود جلب نموده‌است. همچنین این موتورها در کاربردهایی با اختلاف دمای کم و یا زیاد قابل استفاده هستند. بدیهی است نوع سیلندرهای مورد استفاده، نحوه چیدمان آن‌ها و مکانیزم منتقل‌کننده حرکت می‌تواند بر روی عملکرد این موتور تأثیرگذار باشد. از سویی مهندسان و طراحان همواره به دنبال افزایش راندمان و کارایی در سیستم‌های مکانیکی هستند که در موتورها می‌تواند منجر به افزایش کار و یا توان خروجی موتور شود. در این مطالعه، در ابتدا به تحلیل ابعادی انواع مختلف موتور استرلینگ پرداخته می‌شود. سپس با تعریف پارامترهای هندسی موتور به عنوان متغیرهای طراحی، کار خروجی موتور با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بیشینه خواهد شد. همچنین، برای جلوگیری از افزایش ابعاد موتور و فضای اشغالی آن، از روابط قیدی در مساله استفاده خواهد شد. بهینه‌سازی سینماتیکی بر روی چهار نوع مختلف از موتور استرلینگ اعمال می‌شود. برای حل مساله از سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده‌است. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی نشان می‌دهد کار خروجی موتور با ابعاد بهینه، حدوداً ۱/۴۵ تا ۴/۵۹ برابر شده‌است.

۱- مقدمه
قرار گرفته‌اند، موتورهای پاک و از جمله آن‌ها موتورهای استرلینگ هستند.

موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی با چرخه بسته است که سیال عامل موتور هرگز آن را ترک نمی‌کند، دارای صدای کم است، و به راحتی می‌تواند از انواع سوخت‌ها مانند انرژی خورشیدی، انرژی رادیوایزوتوپ، انرژی زمین گرمایی و بسیاری از سوخت‌های نوین دیگر استفاده کند [۱-۳]. این موتور سیکل ترمودینامیکی بسته‌ای شبیه چرخه کارنو دارد و به لحاظ تئوری دارای راندمان ۴۰ الی ۴۵ درصد است، در حالی که راندمان موتور دیزل ۲۸ الی ۳۲ درصد و موتور بنزین سوز ۱۷ الی ۲۵ درصد است و آلودگی بسیار کمتری نسبت به این موتورها دارد [۴]. در مقابل خصوصیات منحصر به فرد و مزایای موتور استرلینگ، مشکلات و محدودیت‌هایی مانند

در دنیای در حال توسعه امروز و با رشد روز افزون تکنولوژی، اکثر کارها با دقت و سرعت بالاتر توسط ماشین‌ها انجام می‌گردد. با توجه به ماشینی شدن کارها و گسترش فناوری‌های جدید، استفاده از انرژی در حال افزایش است. امروزه اکثر انرژی مصرفی جهان از سوخت‌های فسیلی و غیرقابل تجدیدپذیر تهیه می‌گردد. این در حالی است که این سوخت‌ها در حال تمام شدن هستند و اثر مخرب زیادی برای انسان و محیط پیرامون آن دارند. انسان مدرن به فکر آن است که سوختی پاک و قابل تجدید را جایگزین سوخت‌های فسیلی کند. در چنین شرایطی است که انرژی‌های نوین منبع اصلی انرژی جهان می‌شود. در راستای تحقق این امر، یکی از سیستم‌هایی که اخیراً مورد توجه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: varedi@shahroodut.ac.ir



روانکاری و آببندی سخت نیز وجود دارد.

موتور استرلینگ اولین بار توسط رابرت استرلینگ و برادر مهندسش جیمز استرلینگ در سال ۱۸۱۶ در اسکاتلند طراحی شد. سیال کاری موتور استرلینگ اولیه هوا بود و به همین دلیل مردم آن زمان این موتور را با نام موتور هوای گرم می‌شناختند. انرژی آن از سوخت زغال سنگ تامین می‌گردید و مجهز به مبدل حرارتی ویژه‌ای تحت عنوان بازیاب حرارت بود [۴، ۵]. با گذشت بیش از دو قرن از اختراع اولین موتور استرلینگ هنوز مطالعات فراوانی برای بهبودبخشیدن به آن انجام می‌گیرد و استفاده‌های فراوانی از این موتور می‌شود.

اولین مدل نظری قابل قبول برای تحلیل موتور استرلینگ در سال ۱۸۷۱ توسط اشمیت ارائه گردید. فرض اصلی در تحلیل اشمیت آن است که دمای سیال در قسمت گرم و سرد موتور ثابت و به ترتیب برابر با دمای منبع گرم و سرد موتور است [۶]. تحلیل اشمیت امروزه نیز در تحلیل‌های اولیه موتورهای استرلینگ به کار می‌رود. اوریلی و برچوویتز مدل جدیدی را با استفاده از محاسبات عددی ارائه کردند [۷] که به مدل سیمپل^۱ شناخته می‌شود. این مدل یک مدل ادیاباتیک آرمانی است که می‌تواند تأثیرات زاویه فاز، نسبت حجم جاروب و نسبت حجم مرده را پیش‌بینی کند. بابالهی و صیادی [۸] یک مدل حرارتی عددی جدید با نام سیمپل^۲ را معرفی کردند. آن‌ها اتلاف‌های مختلف موتور از جمله اصطکاک مکانیکی، افت گرما و نشت گاز (کاهش جرم گازسیال) را در نظر گرفتند. مدل آن‌ها نسبت به مدل‌های قبلی، عملکرد حرارتی موتور را بهتر پیش‌بینی می‌کرد. علاوه بر مدل‌های ذکرشده، مدل‌های عددی فراوانی دیگری ارائه شد که هر یک نواقص مدل‌های قبلی را بهبود داده‌اند. از سویی، هیچ‌کدام از مدل‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق گرما و جریان سیال در یک موتور استرلینگ نیستند. برای کسب اطلاعات دقیق‌تر در مواردی مانند توزیع سرعت‌ها، دما، چگالی و فشار در کلیه فضاهای کاری، برخی از محققین سراغ مدل‌سازی با استفاده از مباحث دینامیک سیالات محاسباتی رفتند [۹، ۱۰].

مدل‌سازی‌های قبلی که براساس مباحث ترمودینامیکی ارائه شده بودند قادر به پیش‌بینی سرعت پایدار موتور نبودند. بدیهی است سرعت گذرا و حتی سرعت چرخش پایدار را نمی‌توان با استفاده

1 Simple
2 Simple-II

از آنالیز ترمودینامیکی و بدون در نظر گرفتن مکانیزم حرکتی موتور پیش‌بینی کرد. برای پیش‌بینی سرعت و تغییرات آن باید موتور استرلینگ را به صورت دینامیکی نیز مدل کرد. چنگ و یو [۱۱] اولین مدل ترکیبی ترمودینامیکی و دینامیکی را برای موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم حرکتی کم‌ارابه دادند. آن‌ها به مطالعه تأثیرات پارامترهایی مانند سرعت دورانی اولیه، فشار شارژ اولیه، دمای منبع حرارت، زاویه فاز، کورس جابه‌جایی پیستون بر رفتار گذرا موتور پرداختند. آن‌ها در مطالعات بعدی خود مدل ترکیبی را برای تحلیل عملکرد موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم لوزی نیز گسترش دادند [۱۲]. اسکولو و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل تحلیلی اشمیت به عنوان مدل ترمودینامیکی، تحلیلی دینامیکی-ترمودینامیکی از موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم لنگ و لغزنده ارائه نموده‌اند. افضلی [۱۴] نیز با حل عددی معادلات ترکیبی ترمودینامیکی-دینامیکی و با در نظر گرفتن افت فشار در فرایندها، به بررسی اثر دمای منبع حرارت، سرعت اولیه راه‌اندازی موتور، فشار شارژ موتور و چند پارامتر دیگر بر عملکرد کاری موتور پرداخته‌است.

پژوهشگران مختلفی بر روی طراحی‌های جدید و همچنین بهینه‌سازی موتور استرلینگ نیز کار کرده‌اند. توقیانی و همکاران [۱۵] با یک بهینه‌سازی چندهدفه، با چهار متغیر طراحی شامل دمای منبع گرم، کورس جابه‌جایی پیستون، میانگین فشار کاری و فرکانس کاری موتور، راندمان و توان خروجی موتور را افزایش دادند. دوآن و همکاران [۱۶] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، توان خروجی و بازده حرارتی را بهبود بخشیدند. آن‌ها دمای سیال عامل، نسبت حجم مرده، حجم هر یک از محیط‌های کاری و فشار شارژ موتور را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته‌بودند. شیائو و همکاران [۱۷] یک روش ترکیبی برای انجام شبیه‌سازی چندهدفه یک موتور استرلینگ با استفاده از اطلاعات دقیق فشار و حجم توسط آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی ارائه داده‌اند. آن‌ها برای به‌حداکثر رساندن راندمان حرارتی و توان خروجی و همچنین به‌حداقل رساندن توان اتلافی در موتور استرلینگ، پارامترهای قطر و طول لوله‌های گرم‌کن و سردکن، طول بازیاب حرارت، مش ماتریس و قطر سیم را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفتند. در آخرین مطالعات در این حوزه، خوزه ایگاس و دان کلاکاس [۱۸] چند نوع از پیکربندی‌های موتور استرلینگ را مورد مطالعه قرار دادند و با توجه

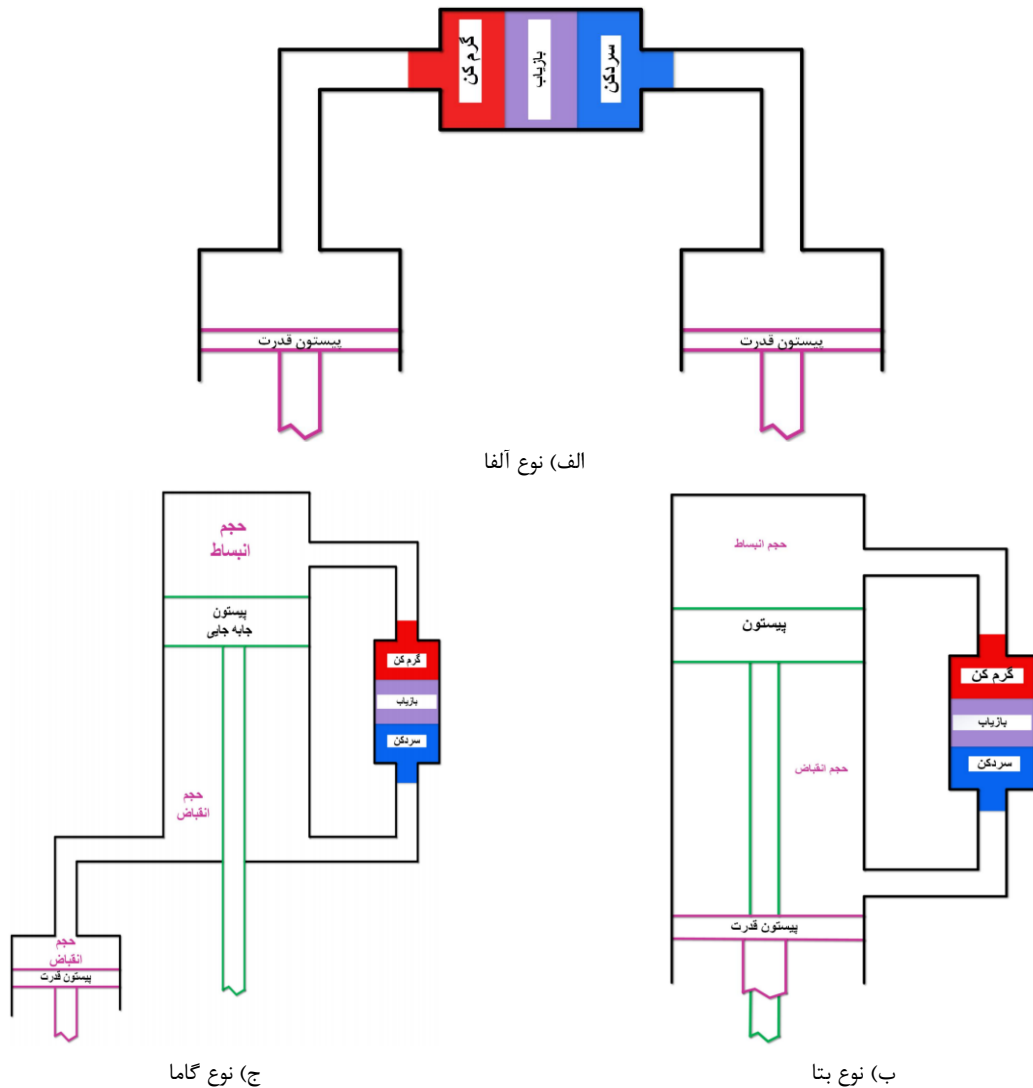
به نمودار فشار-حجم مشخص کردند که هر کدام از این پیکربندی ها باعث می‌شود که موتور استرلینگ در کدام نوع اختلاف دمایی می‌تواند کار کنند. رحمتی و همکاران [۱۹] به بررسی تاثیر هندسه مکانیزم حرکتی موتور و تاثیر آن بر روی افزایش کار خروجی موتور با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌سازی پرداختند. اگر چه بهینه‌سازی آنها موجب افزایش کار خروجی گردیده‌است ولی اندازه لینک‌ها و در نهایت سایز موتور نیز افزایش یافته‌است. این در حالی است که اغلب در طراحی با محدودیت فضا روبه‌رو هستیم.

در این پژوهش به بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی‌های مختلف موتور استرلینگ براساس افزایش کار خروجی موتور پرداخته می‌شود. البته برای حل مشکل افزایش سایز موتور، که در مرجع [۱۹] ایجاد شده‌است، از تابعی به‌عنوان قید فضای اشغالی موتور استفاده شده‌است. در واقع با استفاده از این قید، از افزایش سایز موتور جلوگیری شده و بهینه‌سازی موتور و افزایش کار خروجی موتور آن در همان فضای مقیدشده انجام می‌شود.

۲- مکانیزم موتور استرلینگ

همان طور که قبلاً بیان شد موتور استرلینگ از یک حجم گرم

در این پژوهش به بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی‌های مختلف



شکل ۱. انواع موتور استرلینگ از نظر چیدمان سیلندر

Fig. 1. Types of Stirling engines based on cylinder arrangement

۳-۱-۲- پیکربندی نوع گاما (γ)

استرلینگ نوع گاما (شکل ۱-ج)، در حقیقت مشابه پیکربندی نوع بتا است؛ با این تفاوت که در آن پیستون قدرت و پیستون جابجاکننده، هرکدام سیلندر جداگانه دارند و سیال، بین دو سیلندر جریان می‌یابد [۱۸، ۱۹].

هر یک از پیکربندی‌های ذکر شده می‌توانند دارای مکانیزم حرکتی متفاوتی باشند که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۲- انواع پیکربندی موتور استرلینگ براساس مکانیزم حرکتی

در موتورهای استرلینگ برای این که پیستون‌ها بتوانند به صورت صحیح حرکت کنند نیاز به مکانیزم‌های حرکتی دارند. از این رو مکانیزم‌های مختلفی طراحی و معرفی شده‌است. موتورهای استرلینگ را می‌توان با توجه به مکانیزم حرکتی آن‌ها به چندین قسمت دسته‌بندی نمود.

۱-۲-۲- مکانیزم لنگ-لغزنده

مکانیزم لنگ-لغزنده (شکل ۲-الف) مدت‌هاست که در موتورهای احتراق داخلی بکارگیری می‌شود و بسیار مناسب و قابل‌اعتماد است. قابلیت اطمینان و راحتی ساخت از ویژگی‌های مثبت این مکانیزم است که باعث شده از این مکانیزم به طور گسترده در موتورهای استرلینگ استفاده شود [۱۸، ۱۹].

۲-۲-۲- مکانیزم لوزی

مکانیزم لوزی اولین بار در سال ۱۹۵۰ میلادی توسط شرکت فیلیپس معرفی شد. این مکانیزم شناخته‌شده‌ترین و پیشرفته‌ترین مکانیزم برای موتورهای استرلینگ تک‌سیلندر است. در شکل ۲-ب به خوبی مشاهده می‌شود که این مکانیزم دارای اعضای متحرک و سطوح لغزشی فراوانی است. اگر چه مکانیزم ساختار نسبتاً پیچیده‌ای دارد ولی در عوض دارای توازن دینامیکی است [۱۸، ۱۹].

۳-۲-۲- مکانیزم صفحه‌لنگ

مکانیزم صفحه‌لنگ یکی دیگر از مکانیزم‌های مورد استفاده در موتور استرلینگ می‌باشد که در شکل ۲-ج نشان داده شده‌است.

و یک حجم سرد که از طریق بازیاب حرارت و دو مبدل حرارتی به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل شده‌است. این حجم‌ها باید به درستی و به صورت متناوب تغییر یابند تا انتقال حرارت و الزامات ترمودینامیکی گاز به صورت کامل انجام شود. به منظور تغییر دقیق و متناوب حجم، به یک مکانیزم حرکتی مناسب نیاز است؛ چرا که هر پیکربندی با مکانیزم خاص خود سازگار است. نحوه اتصال سیلندرها به یکدیگر و مخصوصاً مکانیزم‌های حرکتی موتور استرلینگ باعث می‌شود موتور در اختلاف دماها و فشارهای مختلف کار کند. علاوه بر این، نوع و اندازه هر یک از اجزاء روی مقدار کار خروجی موتور استرلینگ موثر است. موتورهای استرلینگ را می‌توان بر اساس معیارهای زیر دسته‌بندی کرد [۱۹، ۲۰]:

- چیدمان سیلندرها نسبت به یکدیگر
- مکانیزم حرکتی موتور

۱-۲-۱- انواع پیکربندی موتور استرلینگ براساس چیدمان سیلندرها

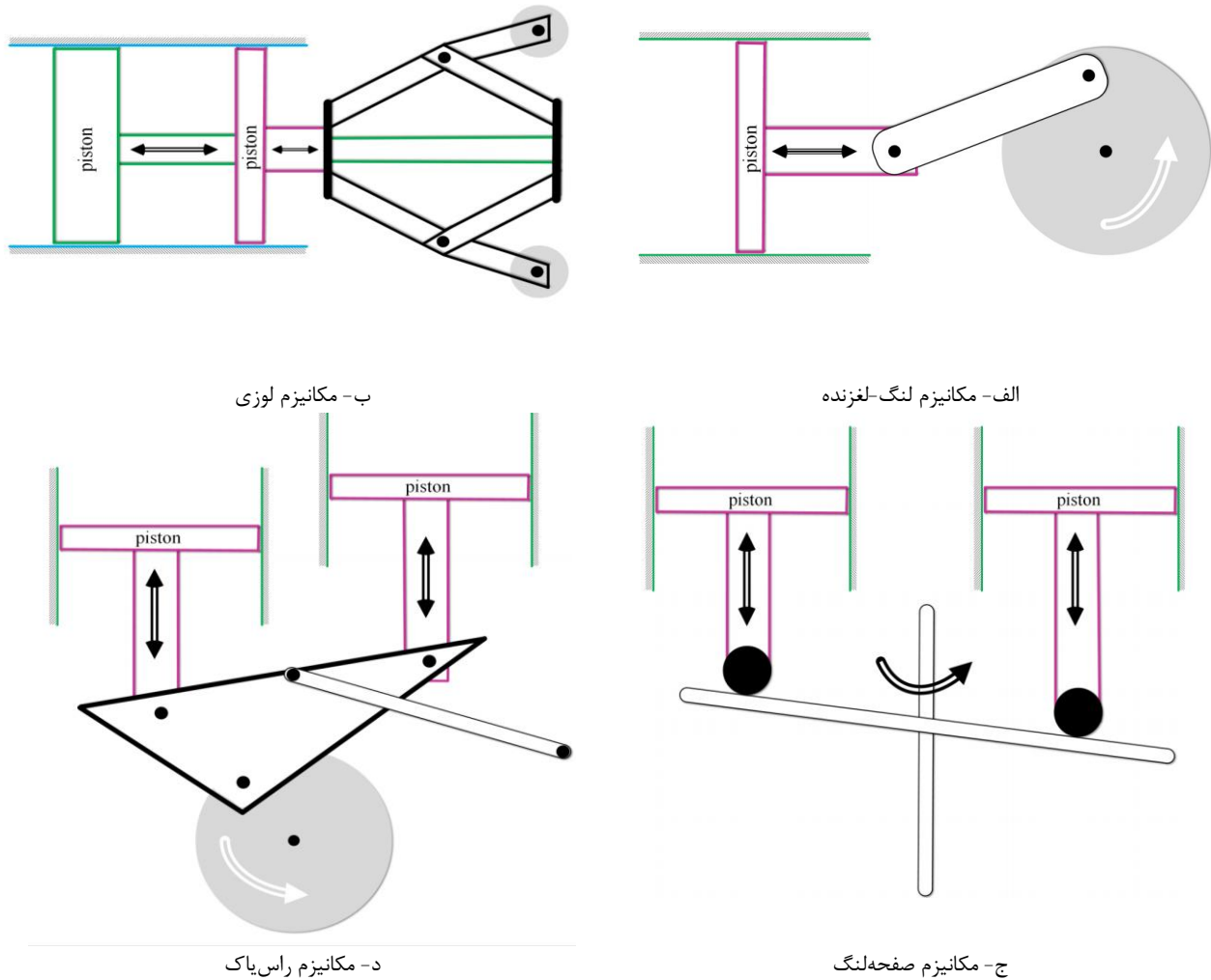
از دسته‌بندی‌های معروف موتور استرلینگ دسته‌بندی براساس نحوه اتصال سیلندرها به یکدیگر می‌باشد. براساس این معیار می‌توان موتورهای استرلینگ را به سه نوع آلفا، بتا و گاما تقسیم کرد.

۱-۱-۲- پیکربندی نوع آلفا (α)

موتور استرلینگ نوع آلفا (شکل ۱-الف)، دارای دو پیستون قدرت در دو سیلندر جداگانه است که در بین آن دو، به ترتیب یک گرم‌کن، یک بازیاب حرارتی و یک خنک‌کن قرار می‌گیرد. فضای بالای پیستون گرم به صورت پیوسته گرم می‌شود و فضای بالای قسمت سرد به طور پیوسته خنک می‌گردد. این نوع پیستون‌ها هم‌زمان وظیفه انبساط و انقباض سیال و وظیفه انتقال سیال را بین محفظه‌های گرم و سرد بر عهده دارند [۱۸، ۱۹].

۲-۱-۲- پیکربندی نوع بتا (β)

استرلینگ نوع بتا (شکل ۱-ب)، اولین نوع پیکربندی است که استرلینگ در سال ۱۸۱۶ میلادی ابداع کرده‌است. این نوع از موتور استرلینگ، فقط دارای یک سیلندر است. همچنین پیستون قدرت، تنها وظیفه انبساط و تراکم سیال را عهده‌دار است و انتقال سیال بین محفظه‌های سرد و گرم را عضو پیستون مانند دیگری بر عهده دارد که جابه‌جاکننده نامیده می‌شود [۱۸، ۱۹].



شکل ۲. انواع موتور استرلینگ از نظر مکانیزم حرکتی

Fig. 2. Types of Stirling engines based on movement mechanism

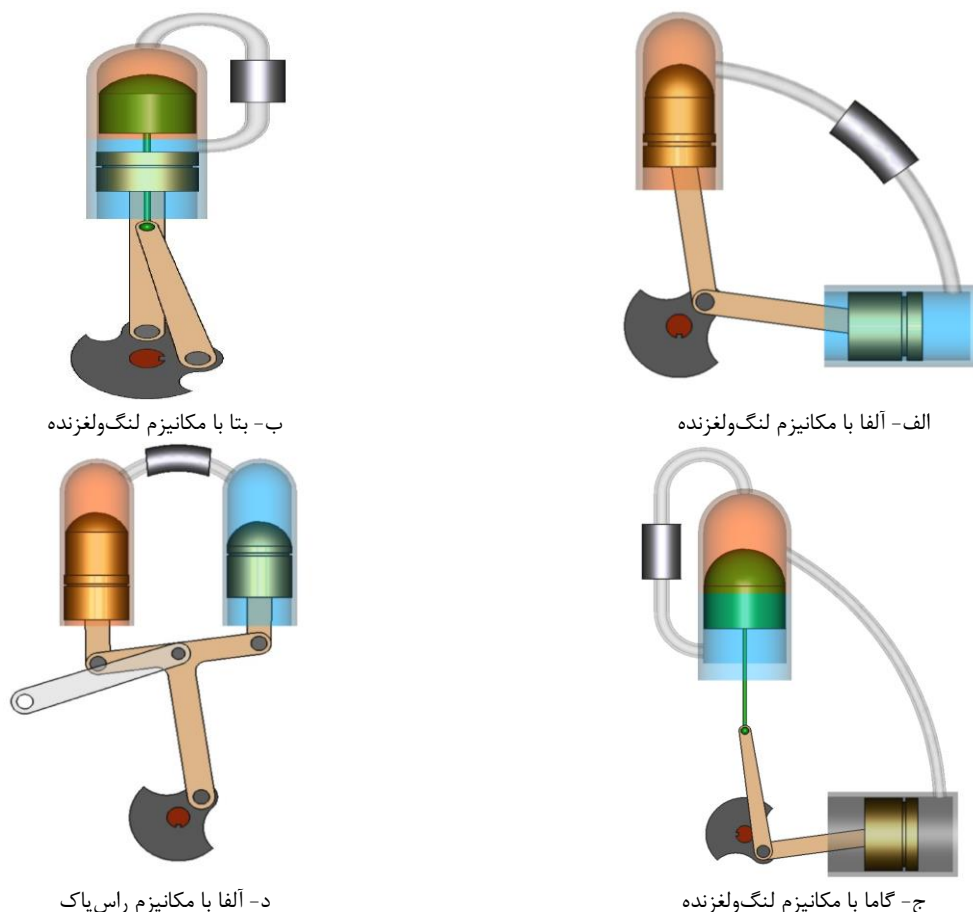
۳- تحلیل ترمودینامیکی

چرخه عملکرد موتور استرلینگ از دو دیدگاه قابل بررسی است: تحلیل‌های نظری، که به صورت محاسبات ریاضی، چرخه استرلینگ را بررسی می‌کنند؛ و اندازه‌گیری‌های تجربی، که ویژگی‌های واقعی چرخه را نشان می‌دهند. طراحی موتور بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از معادلات ریاضی و فیزیکی انجام می‌گیرد و طراحی زمانی قابل قبول است که اندازه‌گیری‌های تجربی موتور ساخته‌شده به طور تقریبی با مقادیر نظری معادل است. اولین تحلیل ریاضی قابل قبول برای تحلیل سیکل استرلینگ، پنجاه سال پس از اختراع آن، توسط اشمیت معرفی شد که به نام روش اشمیت معروف است؛ این تحلیل با این فرض ارائه شد که دمای سیال در قسمت گرم و سرد موتور ثابت و به

همان‌طور که اسم آن گویاست دارای یک صفحه دوار است که با استفاده از آن، حرکت خطی رفت‌وبرگشتی پیستون‌ها به حرکت دورانی تبدیل می‌شود. این طرح فضای نسبی کمی را اشغال می‌کند و می‌توان در سرعت‌های بالا آن را به خوبی آب‌بندی کرد.

۴-۲-۲- مکانیزم راس‌یاک

مکانیزم راس‌یاک (شکل ۲-د) رانخستین بار آقای راس در سال ۱۹۷۹ میلادی با هدف استفاده در موتور استرلینگ نوع آلفا در دانشگاه کمبریج انگلستان معرفی کرد. مکانیزم راس‌یاک بارهای جانبی روی پیستون‌ها و میله‌های اتصال را کاهش می‌دهد و اغلب در موتورهای نوع آلفا برای کاهش نیروی اصطکاک استفاده می‌گردد [۱۸، ۱۹].



شکل ۳. انواع پیکربندی‌های مختلف موتور استرلینگ

Fig. 3. Different types of Stirling engine

جرم سیال درون سامانه ثابت است و سیستم نشتی ندارد. تغییرات حجم‌های کاری نسبت به زاویه میل لنگ سینوسی در مبدل‌های حرارتی تغییر دما وجود ندارد. فشار لحظه‌ای سیال کاری در همه بخش‌های موتور یکسان دمای دیواره سیلندرها و دمای پیستون‌های موتور ثابت بخش‌های دوار موتور با سرعت ثابت می‌چرخند. با توجه به فرضیات فوق، اگر در موتور از گاز کامل و ایده‌آل استفاده شود خواهیم داشت:

$$P.V = mol.R.T$$

(۱)

ترتیب برابر با دمای منبع گرم و سرد موتور و نیز فرایندهای تراکم و انبساط هم دما است. این تحلیل معادلات ترمودینامیکی را خطی کرده و محاسبات به راحتی صورت می‌گیرد. همان‌طور که اشاره شد در تحلیل اشمیت اصل مهم و اصلی آن است که سیال موجود در حجم انبساط موتور و مبدل گرم همیشه در دمایی ثابت و برابر با دمای منبع گرم موتور است و دمای سیال موجود در حجم انقباض و مبدل سرد موتور ثابت و برابر با دمای منبع سرد موتور است. این فرض امکان ساده‌سازی معادلات را فراهم کرده تا رابطه‌ای ساده برای تغییرات فشار سیال به صورت تابعی از تغییرات حجم به دست آید. فرضیات این تحلیل عبارتند از [۲۱]:

- همه فرایندها برگشت پذیرند
- فرآیند بازیابی حرارت، کامل (ایده‌آل) است.
- سیال کاری از معادله حالت گاز کامل پیروی می‌کند.

هر یک از پیکربندی‌های موتور، با استفاده از معادلات سینماتیکی، قابل محاسبه هستند.

۴- تحلیل سینماتیکی

با استفاده از روابط سینماتیکی حاکم بر هر پیکربندی و بدون در نظر گرفتن عامل حرکت، می‌توان حجم انبساط (V_e) و حجم انقباض (V_c) را محاسبه کرد. اگر مقادیر فشار و حجم نسبت به زاویه چرخش مشخص باشند، رابطه تغییرات فشار سیال به عنوان تابعی از تغییرات حجم بدست می‌آید؛ با داشتن این رابطه، نمودار فشار را بر حسب حجم موتور و نیز کار خروجی موتور (مساحت قسمت محصور در نمودار) قابل محاسبه است. در ادامه به تحلیل روابط سینماتیکی چهار مدل مختلف موتور استرلینگ که در شکل ۳ نشان داده شده است پرداخته می‌شود.

۴-۱- آلفا با مکانیزم لنگ و لغزنده

با توجه به هندسه مکانیزم در موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم لنگ و لغزنده که در شکل ۴ نشان داده شده است، می‌توان جابجایی پیستون‌ها را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$AE(\theta) = OE - OA \quad (4)$$

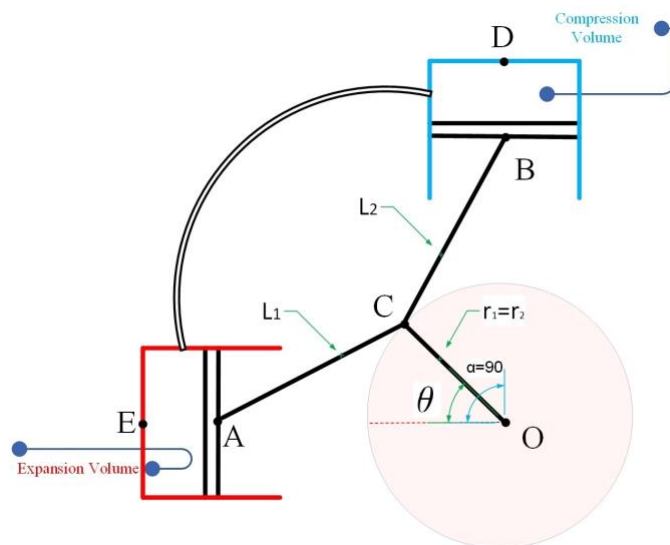
که P فشار مطلق گاز، V حجم، mol جرم مولار گاز، R ثابت جهانی گازها و T دمای مطلق گاز است. ساختار موتور استرلینگ به پنج قسمت حجم انبساط (V_e)، خنک‌کن (k)، بازیاب (r)، گرم‌کن (h) و حجم انقباض (V_c) تقسیم می‌شود. با فرض هم‌دمایی تحلیل اشمیت و اینکه هیچ حجم مرده‌ای در هیچ کدام از بخش‌های موتور از جمله بازیاب و لوله‌های ارتباطی وجود ندارد؛ فشار را می‌توان به صورتی تابعی از زاویه چرخش میل لنگ (θ) به صورت زیر بدست آورد:

$$P(\theta) = (mol \cdot R) / ((V_c(\theta)) / T_c + (V_e(\theta)) / T_e) \quad (2)$$

که θ زاویه چرخش میل لنگ و V_e و V_c به ترتیب حجم انقباض و حجم انبساط نسبت به زاویه چرخش هستند. همچنین T_c و T_e به ترتیب برابر دمای انبساط و انقباض هستند. با استفاده از شرایط اولیه موتور جرم کاری می‌تواند از رابطه حالت محاسبه شود:

$$mol = \frac{P_{mean} \cdot V_{max}}{R \cdot T_{room}} \quad (3)$$

که P_{mean} فشار مطلق موتور در شرایط استاتیکی، V_{max} حداکثر حجم موتور و T_{room} دمای اتاق است. هر یک از حجم‌های فوق برای



شکل ۴. هندسه پیکربندی موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم لنگ-لغزنده

Fig. 4. The geometric configuration of Alpha type Stirling engine with crankshaft mechanism

$$V_c(\theta) = \pi \cdot C_r^2 \cdot BD(\theta) \quad (11) \quad AE(\theta) = OE - \left(r_1 \cdot \cos(\theta) + \sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cdot \sin(\theta)^2} \right) \quad (5)$$

در نتیجه حجم کل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$BD(\theta) = OD - OB \quad (6)$$

$$V_t(\theta) = V_i(\theta) + V_c(\theta) \quad (12)$$

$$BD(\theta) = OD - \left(r_2 \cdot \cos(\alpha - \theta) + \sqrt{l_2^2 - r_2^2 \cdot \sin(\alpha - \theta)^2} \right) \quad (7)$$

حداقل و حداکثر حجم موتور را می‌توان با توجه به مشتق رابطه

V_t نسبت به θ ، با محاسبه ریشه‌های معادله زیر بدست آورد:

که در روابط فوق:

$$\frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} = 0 \quad (13)$$

$$OE = r_1 + l_1 \quad (8)$$

رابطه (۱۳) دارای دو ریشه است که به ترتیب برابر ۴۵ و ۲۲۵

$$OD = r_2 + l_2 \quad (9)$$

درجه می باشند. آنگاه روابط حجم حداقل و حداکثر را می‌توان محاسبه کرد:

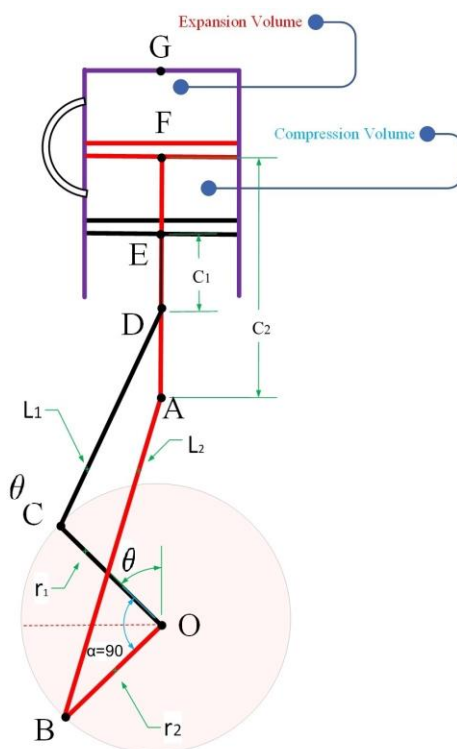
که r_1 شعاع میل لنگ ($r_1 = r_2$)، l_1 و l_2 طول میله‌های اتصال، α نشانگر زاویه فاز و θ نشانگر زاویه چرخش میل لنگ نسبت به

$$V_{min} = V_t(\theta = 45^\circ) \quad (14)$$

سطح افقی است. با داشتن شعاع پیستون انبساط (E_r) و شعاع پیستون انقباض (C_r) خواهیم داشت:

$$V_{max} = V_t(\theta = 225^\circ) \quad (15)$$

$$V_e(\theta) = \pi \cdot E_r^2 \cdot AE(\theta) \quad (10)$$



شکل ۵. هندسه پیکربندی موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم لنگ-لغزنده

Fig. 5. The geometric configuration of Beta type Stirling engine with crankshaft mechanism

زیر بدست آورد:

$$V_{min} = V_t(\theta = 0^\circ) \quad (24)$$

$$V_{max} = V_t(\theta = 180^\circ) \quad (25)$$

اکنون با استفاده از روابط فشار و حجم، می‌توان روابطه کار خروجی موتور را به شرح زیر بدست آورد:

$$W_{\beta_{sc}} = \int_{\theta=0^\circ}^{\theta=180^\circ} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} - \int_{\theta=180^\circ}^{\theta=360^\circ} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} \quad (26)$$

۴-۳- گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل ۶، روابط زیر را خواهیم داشت:

$$FG(\theta) = OG - OF = OG - \quad (27)$$

$$\left(c_2 + r_2 \cdot \cos(\theta) + \sqrt{l_2^2 - r_2^2 \cdot \sin(\theta)^2} \right)$$

$$CD(\theta) = OD - OC \quad (28)$$

$$= OD - \left(r_1 \cdot \cos(\theta - \alpha) + \sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cdot \sin(\theta - \alpha)^2} \right)$$

که:

$$OD = r_1 + l_1 \quad (29)$$

$$OD = r_2 + l_2 + c_2 \quad (30)$$

در روابط فوق، r_1 شعاع میل‌لنگ $(r_1 = r_2)$ ، l_1 و l_2 طول میل‌های اتصال و C_2 طول پیستون‌ها را نشان می‌دهد. همچنین α زاویه فاز و θ نشانگر زاویه چرخش میل‌لنگ است.

حال با داشتن شعاع پیستون انقباض (E_r) و شعاع پیستون جابه‌جایی (D_r) خواهیم داشت:

$$V_e(\theta) = \pi \cdot D_r^2 \cdot FG(\theta) \quad (31)$$

$$V_c(\theta) = V_e(\theta = 180^\circ) - V_e(\theta) \quad (32)$$

اکنون با استفاده از روابط فشار و حجم، می‌توان روابطه کار خروجی موتور را به شرح زیر بدست آورد:

$$W_{\alpha_{sc}} = \int_{\theta=45^\circ}^{\theta=225^\circ} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} - \int_{\theta=225^\circ}^{\theta=405^\circ} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} \quad (16)$$

۴-۲- بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

با توجه به هندسه پیکربندی نوع بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده که در شکل ۵ نشان داده شده است، خواهیم داشت:

$$EG(\theta) = OG - OE = OG - \quad (17)$$

$$\left(c_1 + r_1 \cdot \cos(\theta) + \sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cdot \sin(\theta)^2} \right)$$

$$FG(\theta) = OG - OF$$

$$= OG - \left(c_2 + r_2 \cdot \cos(\theta + \alpha) + \sqrt{l_2^2 - r_2^2 \cdot \sin(\theta + \alpha)^2} \right) \quad (18)$$

که:

$$OG = r_2 + l_2 + C_2 \quad (19)$$

و r_1 شعاع میل‌لنگ $(r_1 = r_2)$ ، l_1 و l_2 طول میل‌های اتصال و C_1 و C_2 طول پیستون‌ها را نشان می‌دهد. همچنین α زاویه فاز و θ نشانگر زاویه چرخش میل‌لنگ است. بنابراین با داشتن شعاع پیستون انقباض (E_r) خواهیم داشت:

$$V_e(\theta) = \pi \cdot E_r^2 \cdot FG(\theta) \quad (20)$$

$$V_t(\theta) = \pi \cdot E_r^2 \cdot EG(\theta) \quad (21)$$

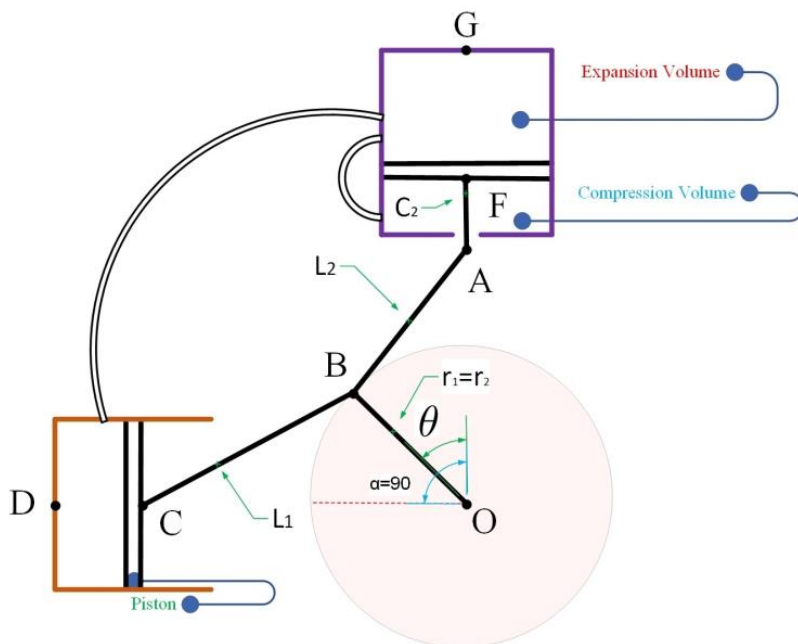
آنگاه حجم انقباض از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_c(\theta) = V_t(\theta) - V_e(\theta) \quad (22)$$

بنابراین، حجم حداقل و حداکثر، ریشه‌های مشتق رابطه (۲۲) می‌باشد.

$$\frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} = 0 \quad (23)$$

رابطه (۲۳) دارای دو ریشه است که به ترتیب برابر صفر و 180° درجه می‌باشد. آنگاه روابط حجم حداقل و حداکثر را می‌توان بصورت



شکل ۶. هندسه پیکربندی موتور استرلینگ نوع گاما با مکانیزم لنگ-لغزنده

Fig. 6. The geometric configuration of Gama type Stirling engine with crankshaft mechanism

۴-۴- آلفا با مکانیزم راس‌ی‌اک

آنگاه حجم کل از رابطه زیر بدست می‌آید:

با توجه به هندسه مکانیزم که در شکل ۷ نشان داده شده است، می‌توان نوشت:

$$V_t(\theta) = V_e(\theta = 180^\circ) + \pi \cdot E_r^2 \cdot CD(\theta) \quad (33)$$

بنابراین، حجم حداقل و حداکثر در این پیکربندی نیز ریشه‌های مشتق رابطه (۳۳) می‌باشد.

$$OA(\theta) = OE - \left(-r_1 \cdot \sin(\theta) - \frac{r_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta)}{2l_1} + \sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cdot \cos(\theta)^2} \right) \quad (38)$$

$$\frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} = 0 \quad (34)$$

$$OB(\theta) = OD - \left(-r_1 \cdot \sin(\theta) + \frac{r_1 \cdot l_2 \cdot \cos(\theta)}{2l_1} + \sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cdot \cos(\theta)^2} \right) \quad (39)$$

رابطه (۳۴) دارای دو ریشه است که به ترتیب برابر ۹۰ و ۲۷۰ درجه می‌باشد. آنگاه روابط حجم حداقل و حداکثر را می‌توان بصورت زیر بدست آورد:

که شعاع لنگ، l_1 و l_2 طول لینک‌ها، و θ زاویه چرخش میل‌لنگ نسبت به سطح افقی است. علاوه بر این، OD به صورت زیر محاسبه شود:

$$V_{min} = V_t(\theta = 90^\circ) \quad (35)$$

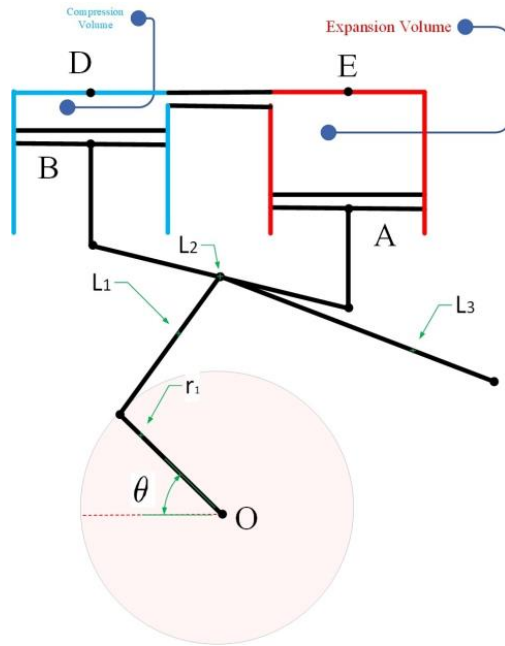
$$V_{max} = V_t(\theta = 270^\circ) \quad (36)$$

$$OD = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + r_1^2} - l_2^2 \quad (40)$$

اکنون با استفاده از روابط فشار و حجم، می‌توان روابط خروجی موتور را به شرح زیر بدست آورد:

با داشتن شعاع پیستون انبساط (E_r) و شعاع پیستون انقباض

$$W_{\gamma_{sc}} = \int_{\theta=90^\circ}^{\theta=270^\circ} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} - \int_{\theta=270^\circ}^{\theta=450^\circ} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} \quad (37)$$



شکل ۷. هندسه پیکربندی موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم راس‌یاک

Fig. 7. The geometric configuration of Alpha type Stirling engine with Ross-Yoke mechanism

اکنون با استفاده از روابط فشار و حجم، می‌توان رابطه کار خروجی موتور را به شرح زیر محاسبه نمود:

$$W_{\alpha_{ry}} = \int_{\theta=90^{\circ}}^{\theta=270^{\circ}} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} - \int_{\theta=270^{\circ}}^{\theta=450^{\circ}} P(\theta) \cdot \frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} \quad (47)$$

کار خروجی موتور استرلینگ برای هر یک از پیکربندی‌ها از انتگرال‌گیری فشار در حاصل ضرب تغییرات فشار بدست می‌آید که این انتگرال معادل سطح محصور در نمودار فشار-حجم است.

۵- فرایند بهینه‌سازی

کار خروجی به دست آمده برای هر یک از پیکربندی‌ها (معادلات (۱۶)، (۲۶)، (۳۷) و (۴۷)) وابسته به فشار و حجم است، از طرفی معادلات فشار و حجم خود وابسته به طول لینک‌ها و شعاع سیلندرها می‌باشند. در نتیجه تغییرات کار خروجی وابسته به پارامترهای هندسی شامل طول لینک‌ها و شعاع سیلندرها می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن مشخصه‌های هندسی موتور به عنوان پارامترهای طراحی، می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، کار خروجی موتور را به حداکثر رساند. مساله بهینه‌سازی بطور خلاصه بصورت زیر خواهد بود:

C_r خواهیم داشت:

$$V_e(\theta) = \pi \cdot E_r^2 \cdot OA(\theta) \quad (41)$$

$$V_c(\theta) = \pi \cdot C_r^2 \cdot OB(\theta) \quad (42)$$

آنگاه حجم کل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_t(\theta) = V_e(\theta) + V_c(\theta) \quad (43)$$

مانند دیگر مکانیزم‌ها، حجم حداقل و حداکثر، ریشه‌های مشتق رابطه (۴۳) می‌باشد.

$$\frac{d(V_t(\theta))}{d\theta} = 0 \quad (44)$$

رابطه فوق دارای دو ریشه ۹۰ و ۲۷۰ درجه می‌باشد. آنگاه روابط حجم حداقل و حداکثر را می‌توان بصورت زیر بدست آورد:

$$V_{min} = V_t(\theta = 90^{\circ}) \quad (45)$$

$$V_{max} = V_t(\theta = 270^{\circ}) \quad (46)$$

جدول ۱. متغیرهای طراحی موردنظر برای چهار چیدمان مختلف و مقادیر مجاز تغییرات آن‌ها

Table 1. The considered design variables for four different layouts and their permissible variations

متغیرها	آلفا با مکانیزم لنگ و لغزنده	بتا با مکانیزم لنگ و لغزنده	گاما با مکانیزم لنگ و لغزنده	آلفا با مکانیزم راس‌یاک
l_1 (cm)	کمینه ۵ بیشینه ۷۰	۵ ۳۰	۳ ۲۰	۵ ۲۰
l_2 (cm)	کمینه ۵ بیشینه ۷۰	۵ ۳۰	۳ ۲۰	۵ ۲۰
C_1 (cm)	کمینه -- بیشینه --	۱ ۸	-- --	-- --
C_2 (cm)	کمینه -- بیشینه --	۴ ۱۶	۳ ۱۲	-- --
$r_1 = r_2$ (cm)	کمینه ۱ بیشینه ۴	۱ ۴	۱ ۵	۱ ۴
E_r (cm)	کمینه ۱ بیشینه ۵	۱ ۴	۱ ۴	۱ ۴
C_r (cm)	کمینه ۱ بیشینه ۸	-- --	-- --	۱ ۷
D_r (cm)	کمینه -- بیشینه --	-- --	۱ ۷	-- --

اشغالی موتور موردنظر و OS_{max} بیشینه مقدار مجاز آن می‌باشد. در بهینه‌سازی سینماتیکی که در مرجع [۱۹] انجام شد، بدلیل عدم استفاده از قید فضای اشغالی موتور، مقادیر طول لینک‌ها و شعاع سیلندرها بسیار بزرگ شده و معمولاً به مقدار بالایی حد مجاز خود رسیده‌اند. همین امر موجب شده موتور بهینه‌شده از نظر اندازه‌ای بسیار بزرگتر از موتور اصلی شود و این موضوع، افزایش چشم‌گیر کار خروجی را زیر سوال برده است. زیرا بدیهی است موتوری که دارای اندازه‌های بزرگتری است، کار خروجی بیشتری نیز تولید می‌کند. از سوی دیگر طراحان سیستم‌های مکانیکی، با توجه به کمبود فضای کار، همواره به دنبال کاهش اندازه‌ها و سایز سیستم‌های طراحی شده هستند. به عبارت دیگر معمولاً علاقه‌مند هستیم تا موتوری با اندازه کوچک‌تر با کار خروجی بیشتر در اختیار داشته باشیم.

از این رو در این پژوهش، برای هر یک از پیکربندی‌های موتور استرلینگ، رابطه‌ای بنام فضای اشغالی^۱ (OS) استخراج شده‌است

$$Max F = W$$

s.t.:

$$P_{min} \leq P \leq P_{max} \quad (48)$$

$$OS \leq OS_{max}$$

$$x_{min} < x_i < x_{max}$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

در رابطه فوق F تابع هدف مساله بهینه‌سازی و W مقدار کار خروجی موتور می‌باشد. همچنین X بردار متغیرهای طراحی مساله و x_{min} و x_{max} به ترتیب محدوده‌های بالا و پایین متغیرهای طراحی می‌باشند. جدول ۱ متغیرهای طراحی موردنظر برای چهار چیدمان مختلف و مقادیر مجاز تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد.

همچنین در معادله (۴۸)، P فشار موتور و P_{min} و P_{max} مقادیر کمینه و بیشینه مجاز فشار موتور می‌باشند. در این پژوهش، برای ممانعت از افزایش بیش از اندازه سایز موتور، قید جدیدی بنام قید فضای اشغالی در نظر گرفته شده‌است. در رابطه فوق OS مقدار فضای

1 Occupied Space

جدول ۲. محدوده مجاز قيود مساله

Table 2. The permissible range for the values of the constraints

آلفا با مکانیزم راس‌یاک	گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده	بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده	آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده	
۱۵۰	۲۵۰	۱۵۰	۱۸۰	P_{min} (kPa)
۳۰۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۱۲۰۰	P_{max} (kPa)
۱۰۹۷/۸۲	۳۸۳/۲۷	۲۵۷/۶۱	۳۰۱/۵۹	OS_{max} (cm ³)

بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک^۱، الگوریتم ازدحام ذرات^۲ و الگوریتم رقابت استعماری^۳ استفاده می‌شود و نتایج این روش‌ها با هم مقایسه می‌شوند. در ادامه توضیح مختصری در مورد این روش‌های بهینه‌سازی ارائه خواهد شد.

۱-۵- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک که در سال ۱۹۷۵ معرفی شد، یکی از مشهورترین الگوریتم‌های تکاملی مورد استفاده توسط پژوهش‌گران در حوزه‌های مختلف بهینه‌سازی است. این الگوریتم با استفاده از روش جستجوی جامع و مبتنی بر مفاهیم ژنتیک، انتخاب طبیعی و نظریه قانون تکامل داروین، به دنبال بقای اصلح می‌گردد [۲۲]. بردار متغیرهای طراحی مسئله به صورت کروموزوم‌ها تشبیه می‌شوند و سپس جمعیت اولیه تصادفی توسط کروموزوم‌ها تولید می‌شود.

الگوریتم ژنتیک دارای سه عملگر می‌باشد. عملگر تولید مجدد، عملگر تقاطع و عملگر جهش سه عملگر اصلی الگوریتم ژنتیک می‌باشند. در عملگر تولید مجدد آن دسته از کروموزوم‌هایی که قوی‌تر هستند از شانس بیشتری برای انتخاب شدن برخوردار هستند و آن دسته از کروموزوم‌هایی که ضعیف هستند به مرور حذف خواهند شد. در این قسمت کروموزوم‌هایی از جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند. عملگر تقاطع اصلی‌ترین اپراتور الگوریتم ژنتیک است و برای ایجاد فردی جدید با انتقال داده بین والدین به کار می‌رود. معمولاً دو فرد تصادفی از جمعیت تولیدشده توسط عملگر تولید مجدد جدا می‌شوند و بعضی از بخش‌ها با هم جابه‌جا می‌شوند. عملگر سوم، جهش ژنتیکی

که برای چهار پیکربندی مورد مطالعه در روابط ۴۹ تا ۵۲ نشان داده‌است.

$$OS_{\alpha_SC} = (2\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, C_r)) + (\pi E_r^2 (OE - r_1)) + (\pi C_r^2 (OD - r_1)) \quad (49)$$

$$OS_{\beta_SC} = (2\pi r_1^2 E_r) + (\pi E_r^2 (OG - r_1)) + (\pi D_r^2 (OD - r_1)) \quad (50)$$

$$OS_{\gamma_SC} = (2\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, D_r)) + (\pi E_r^2 (OG - r_1)) + (\pi D_r^2 (OG - r_1)) \quad (51)$$

$$OS_{\alpha_RY} = (\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, C_r)) + (2 \cdot \min(E_r, C_r) \cdot \max(2r_1, 2l_2)(r_1 + l_1)) + (\pi E_r^2 (OE - l_1 + r_1)) + (\pi C_r^2 (OE - l_1 + r_1)) \quad (52)$$

در روابط فوق، مقدار تقریبی فضای اشغالی پیکربندی‌های مختلف موتور استرلینگ نشان داده شده‌است. روابط فوق براساس شکل‌های ۴ تا ۷ و براساس در نظر گرفتن چندین استوانه، که فضای اشغالی پیستون‌ها و فضای حرکتی لینک‌ها را مدل‌سازی می‌کنند، استخراج شده‌است. مقدار بیشینه فضای اشغالی موتور (OS_{max}) که بصورت یک قید وارد مساله می‌شود، براساس روابط فوق و با توجه به اطلاعات موتورهای با طرح اصلی، که در مرجع [۱۸] معرفی شده‌است، بدست می‌آید. در واقع در فرایند بهینه‌سازی به دنبال طرح بهینه‌ای هستیم که علاوه بر افزایش کار خروجی، سائز موتور (براساس روابط فوق) از سائز طرح اصلی بیشتر نشود. جدول ۲ مقادیر مجاز تغییرات فشار و فضای اشغالی موتور را، که دو قید مساله بهینه‌سازی می‌باشند، نشان می‌دهد.

برای بهینه‌سازی مساله تعریف شده در این پژوهش از سه روش

1 Genetic Algorithm (GA)
2 Particle Swarm Optimization (PSO)
3 Imperialistic Competition Algorithm (ICA)

فراابتکاری است که اخیراً برای مسائل بهینه‌سازی توسعه یافته‌است. این الگوریتم توسط آتش‌پز و همکارانش در سال ۲۰۰۷ براساس رقابت امپریالیستی پیشنهاد شده‌است [۲۴]. الگوریتم رقابت استعماری الگوریتمی می‌باشد که از فرایند اجتماعی سیاسی انسان‌ها الگوبرداری کرده‌است. این الگوریتم مانند دیگر الگوریتم‌ها با یک جمعیت اولیه تصادفی آغاز به کار می‌کند. هر عضو از جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته‌ی مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر بسته به قدرت خود تعدادی کشور مستعمره را تحت کنترل خود قرار می‌دهد. در ادامه کشورهای استعمارگر برای داشتن مستعمره‌های بیشتر عملیاتی را تحت عنوان سیاست جذب و رقابت استعماری انجام می‌دهند. مراحل این الگوریتم تکاملی به شرح زیر می‌باشد [۲۴]:

• ایجاد امپراتوری‌های اولیه: برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی کشورهای اولیه‌ای با اندازه $N_{Country}$ تولید می‌شوند. براساس مقادیر

طبیعی را مدل‌سازی می‌کند و برای تغییر تصادفی برخی از ویژگی‌های افراد با احتمال جهش اندک استفاده می‌شود [۲۲].

۲-۵- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات معرفی شد و مبتنی بر رفتار ازدحامی پرندگان می‌باشد [۲۲]. این الگوریتم، همانند الگوریتم ژنتیک، از قوی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی مورداستفاده توسط پژوهشگران می‌باشد. هر پرنده (ذره) برای یافتن منبع غذایی (نقطه بهینه) علاوه بر دانش شخصی، از اطلاعات کل گروه نیز بهره می‌برد. در واقع، اگر یک ذره یک مسیر مناسب برای غذا را تشخیص دهد، یا مسیری را برای رسیدن به حداکثر نقطه در مساله بهینه‌سازی پیدا کند، ذرات دیگر گروه نیز از این امر مطلع شده و قادر به دنبال کردن این مسیر هستند، حتی اگر موقعیت آن‌ها نزدیک به نقطه بهینه نباشد. در واقع در ابتدا سرعت هر ذره براساس اطلاعات شخصی و گروهی بدست می‌آید و سپس با استفاده از سرعت، مقادیر مکانی هر ذره بروزرسانی می‌شود. مقادیر سرعت و مکان هر ذره در این الگوریتم در هر تکرار طبق روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \quad , j = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (53)$$

$$V_j(i) = \gamma(i)V_j(i-1) + c_1u_1(P_{best,j} - X_j(i-1)) + c_2u_2(G_{best,j} - X_j(i-1)) \quad , j = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (54)$$

که c_1 و c_2 ثابت‌هایی هستند که به ترتیب به عنوان ضرایب یادگیری شناختی (فردی) و اجتماعی (گروهی) شناخته می‌شوند. مقادیر این ثابت‌ها معمولاً ۲ است. u_1 و u_2 نیز دو عدد تصادفی هستند. در نهایت، یک عامل وزنی، که توسط $\gamma(i)$ نشان داده می‌شود، در این رویکرد استفاده می‌شود، که می‌تواند ثابت یا متغیر (بین ۰ و ۱) باشد. این فاکتور معمولاً با افزایش تعداد تکرارها به صورت کاهشی در نظر گرفته می‌شود [۲۳].

۳-۵- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری یکی از الگوریتم‌های

جدول ۳. پارامترهای استفاده‌شده در الگوریتم‌های بهینه‌سازی

Table 3. Parameters used in optimization algorithms

مقدار	نام الگوریتم	پارامتر
۲۰۰	GA, PSO, ICA	حداکثر تعداد تکرارها
۱۰۰	GA, PSO, ICA	تعداد جمعیت
۰/۸	GA	ضریب ترکیب
۰/۵	GA	ضریب جهش
۰/۵	PSO	وزن اینرسی (سرعت)
۰/۸	PSO	ضریب کاهش وزن اینرسی
۲	PSO	ضریب یادگیری فردی
۲	PSO	ضریب یادگیری اجتماعی
۱۰	ICA	تعداد استعمارگرها
۲	ICA	ضریب جذب
۰/۱	ICA	ضریب انقلاب
۰/۱	ICA	ضریب میانگین ارزش مستعمرات

مستعمرات، اگر یک امپراتوری تمام مستعمرات خود را از دست بدهد امپراتوری دچار فروپاشی شده و از بین می‌رود.

در پایان رقابت امپریالیستی در این الگوریتم، تمام امپراتوری‌ها از بین می‌روند و تنها قدرتمندترین امپراتوری (یک امپراتوری) باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، همه مستعمرات تحت کنترل قدرتمندترین امپراتوری قرار خواهند گرفت.

جدول ۳ مقادیر پارامترهای ثابت مورد استفاده در سه روش بهینه‌سازی توصیف‌شده را نشان می‌دهد. براساس این جدول، تعداد جمعیت و تعداد تکرار برای همه الگوریتم‌ها یکسان و به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۲۰۰ می‌باشد.

۶- حل عددی و نتایج

در این بخش نتایج بهینه‌سازی چهار طرح مختلف موتور استرلینگ، نوع آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده، نوع بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده، نوع گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده و نوع آلفا با مکانیزم راس‌یاک با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، ازدحام ذرات و رقابت استعماری ارائه شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه خواهد شد. برای حل عددی معادلات، مقادیر ثابت پارامترهای ترمودینامیکی در جدول ۴ ارائه شده است.

۶-۱- موتور آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

نتایج بهینه‌سازی این طرح با سه روش بهینه‌سازی در جدول ۵ نشان داده شده است. علاوه بر این، نمودار فشار-حجم برای موتور بهینه و مقایسه آن با موتور اصلی، و تغییر در مقادیر تابع هدف برای تکرارهای مختلف، با استفاده از الگوریتم ژنتیک،

جدول ۴. مقادیر ثابت پارامترهای ترمودینامیکی

Table 4. Constant values of the thermodynamic parameters

واحد	مقدار	پارامتر
$\frac{\text{cm}^3 \cdot \text{kPa}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$	$8/314 \times 10^2$	ثابت جهانی گازها (\bar{R})
kPa	۱۰۱/۳۲۵	فشار متوسط (P_{mean})
K	۲۹۸	دمای اتاق (T_{room})
K	۳۹۸	دمای انقباض (T_c)
K	۸۵۰	دمای انبساط (T_e)

تابع هدف، قدرتمندترین کشورها به عنوان امپریالیست‌ها و سایر کشورها به عنوان مستعمرات فرض می‌شوند. قدرت هر کشور مربوط به تناسب آن است و هر مستعمره براساس قدرت خود به کشورهای استعمارگر اختصاص دارد. در حقیقت، یک امپریالیست و مستعمرات آن یک امپراطوری را ایجاد می‌کنند.

• جذب: پس از ایجاد امپراتوری‌های اولیه، روند جذب در جایی آغاز می‌شود که کشور امپریالیستی مستعمرات خود را در هر امپراتوری بر اساس زبان و فرهنگ جذب می‌کند. این جذب با حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست مدل می‌شود.

• انقلاب: در فرایند جذب یک امپراتوری، هنگامی که یک مستعمره به سمت امپراتوری حرکت می‌کند، یک مستعمره ممکن است با هزینه کمتری نسبت به امپریالیست به موقعیت بهتری برسد. در چنین مواردی، موقعیت مستعمره و امپریالیست تغییر خواهد کرد و بنابراین الگوریتم با امپریالیست جدید ادامه خواهد یافت.

• قدرت کل یک امپراتوری: قدرت یک امپراتوری به طور مستقیم به قدرت امپریالیست و مستعمراتش بستگی دارد، که قدرت امپریالیستی از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین قدرت کل یک امپراتوری را می‌توان به شرح زیر بدست آورد:

$$F_{tot,n} = Fitness(X_{imperialist_n}) + \zeta \text{mean}\{Fitness(X_{imperialist_n})\} \quad (55)$$

که $F_{tot,n}$ کل تناسب امپراطور n ام است، و ζ عددی مثبت است که کم‌تر از ۱ می‌باشد.

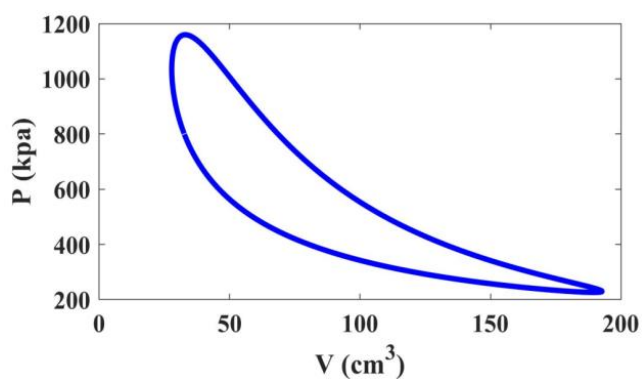
• رقابت امپریالیستی: در مرحله بعد، تمام امپراتوری‌ها تمایل به تملک و کنترل مستعمرات سایر امپراتوری‌ها دارند. بنابراین، رقابت برای تصرف ضعیف‌ترین مستعمره (یا مستعمرات) ضعیف‌ترین امپراتوری توسط سایر امپراتوری‌ها آغاز می‌شود. ضعیف‌ترین کلونی در ضعیف‌ترین امپراطوری به احتمال زیاد توسط قدرتمندترین امپراطوری تسخیر می‌شود. به عبارت دیگر این مستعمره لزوماً قوی‌ترین امپراطوری را ندارد.

• از بین بردن ضعف امپراتوری‌ها: همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، ضعیف‌ترین مستعمرات متعلق به ضعیف‌ترین امپریالیست‌ها در بین سایر امپراتوری‌ها تقسیم می‌شوند. به عبارت دیگر، ضعیف‌ترین امپراتوری ضعیف‌ترین مستعمرات خود را در تکرار الگوریتم بهینه‌سازی از دست خواهد داد. در طی فرایند از دست دادن

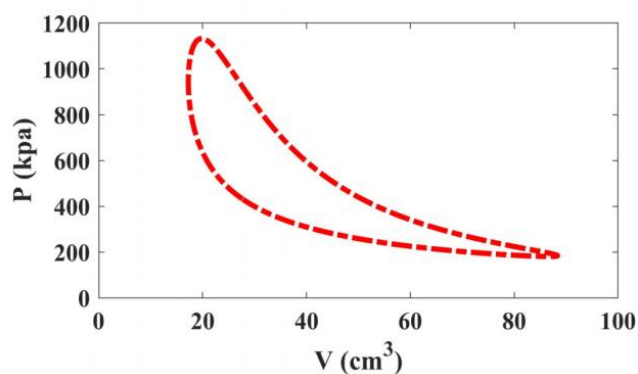
جدول ۵. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی برای موتور نوع آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

Table 5. Kinematic optimization result for Alpha type engine with crankshaft mechanism

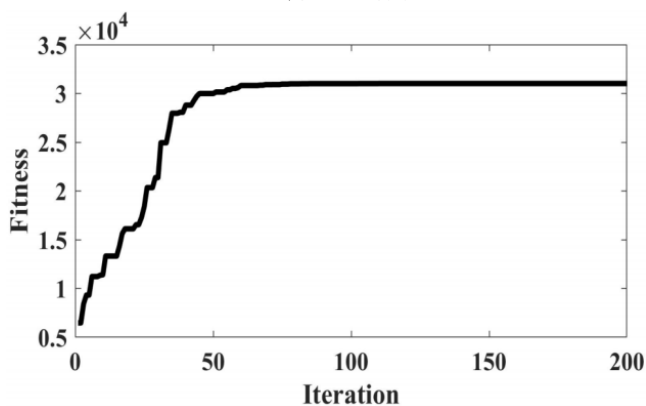
مقادیر بهینه الگوریتم رقابت استعماری	مقادیر بهینه الگوریتم ازدحام ذرات	مقادیر بهینه الگوریتم ژنتیک	مقادیر اصلی مرجع [۱۸]	
۵	۵	۵/۰۳	۱۰	l_1 (cm)
۵	۵	۵/۰۵	۱۰	l_2 (cm)
۲/۲۴	۲/۲۵	۲/۲۶	۲	$r_1 = r_2$ (cm)
۳/۳۳	۳/۵۰	۳/۲۹	۲	E_r (cm)
۲	۱/۸۰	۲/۰۲	۲	C_r (cm)
۳۱۲۲۷/۱۹	۳۱۷۵۴/۷۹	۳۱۰۲۲/۷۹	$W_0=۱۵۱۷۹/۴۸$	W ($\text{kg}(\text{cm/s})^2$)
۲/۰۵	۲/۰۹	۲/۰۴	۱	W/W_0



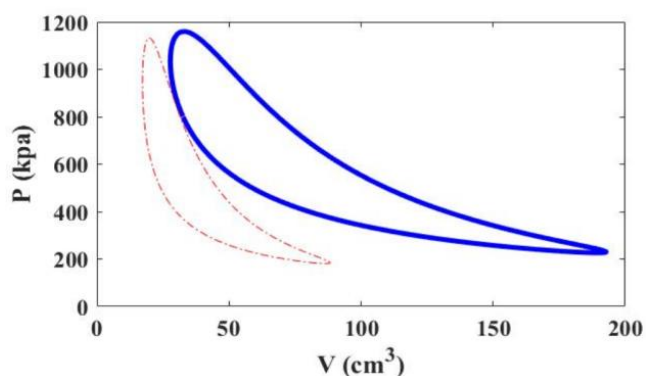
موتور با مکانیزم بهینه



موتور با مکانیزم اصلی [۱۸]



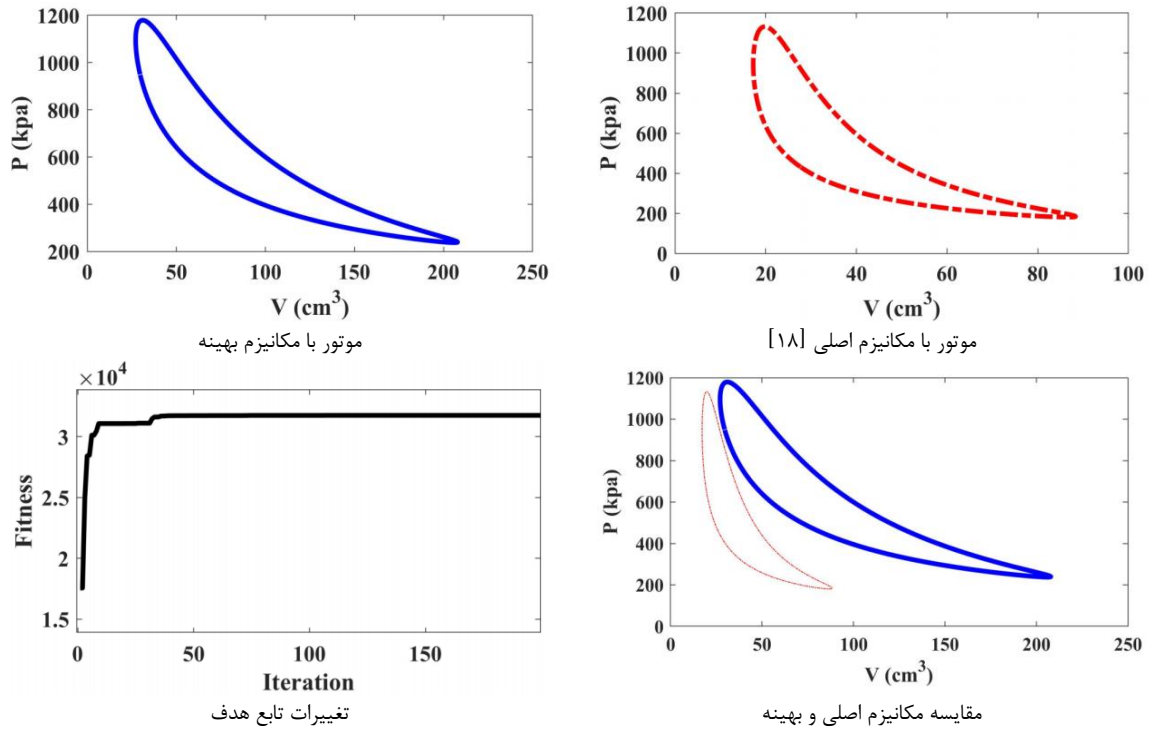
تغییرات تابع هدف



مقایسه مکانیزم اصلی و بهینه

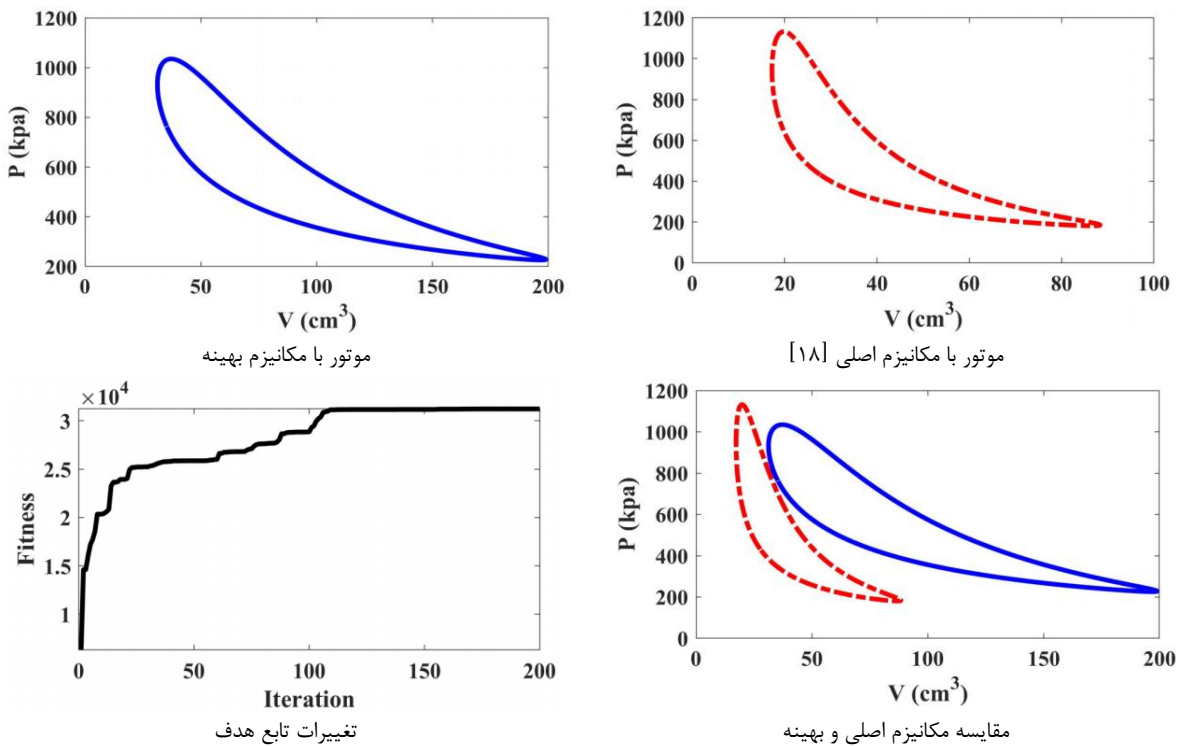
شکل ۸. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم ژنتیک

Fig. 8. Kinematic optimization result for Alpha type with crankshaft using GA



شکل ۹. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم ازدحام ذرات

Fig. 9. Kinematic optimization result for Alpha type with crankshaft using PSO



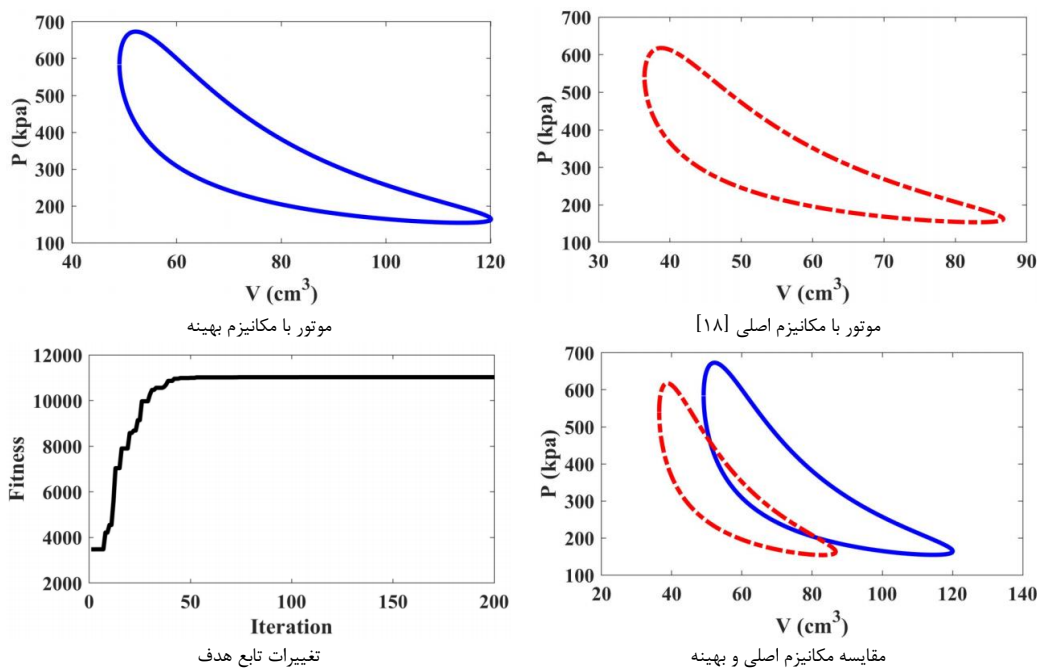
شکل ۱۰. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم رقابت استعماری

Fig. 10. Kinematic optimization result for Alpha type with crankshaft using ICA

جدول ۶. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی برای موتور نوع بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

Table 6. Kinematic optimization result for Beta type engine with crankshaft mechanism

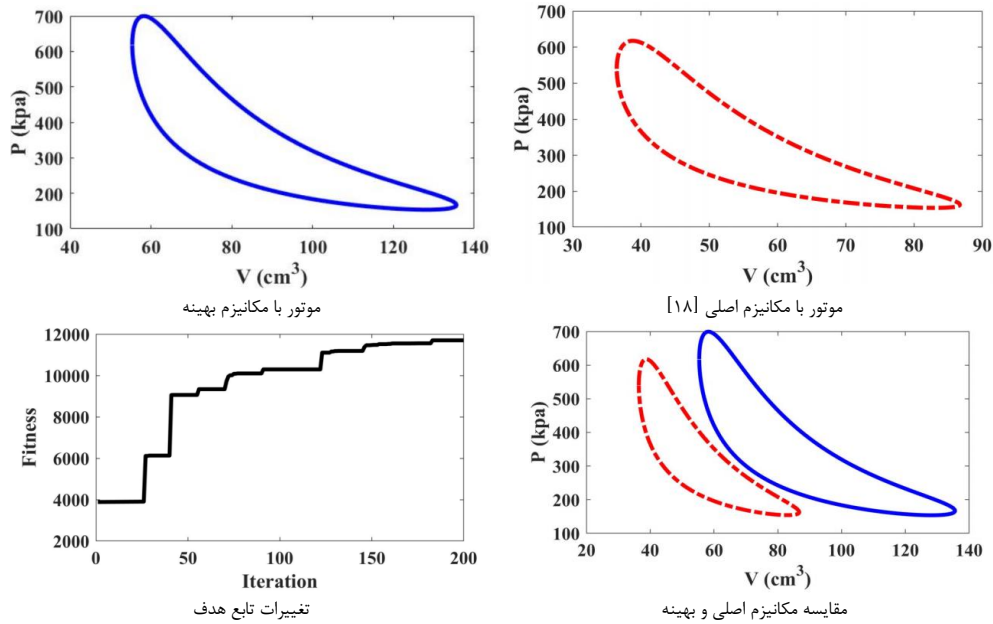
مقادیر بهینه الگوریتم رقابت استعماری	مقادیر بهینه الگوریتم ازدحام ذرات	مقادیر بهینه الگوریتم ژنتیک	مقادیر اصلی مرجع [۱۸]	
۵/۳۲	۷/۹۵	۸/۴۳	۱/۳۵	l_1 (cm)
۵	۷/۹۲	۵	۱۰	l_2 (cm)
۵/۴۹	۱/۱۴	۲/۰۶	۲/۱	c_1 (cm)
۹/۵۶	۵/۴۹	۹/۱۰	۸/۵	c_2 (cm)
۲/۶۳	۳/۱۰	۲/۵۳	۲	$r_1 = r_2$ (cm)
۲/۰۵	۱/۹۵	۲/۱۱	۲	E_r (cm)
۱۰۶۵۲/۱۶	۱۱۷۰۲/۰۴	۱۱۰۲۴/۲۴	W_0 =۷۳۳۵/۸۹	W (kg (cm/s) ²)
۱/۴۵	۱/۵۹	۱/۵۰	۱	W / W_0



شکل ۱۱. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم ژنتیک

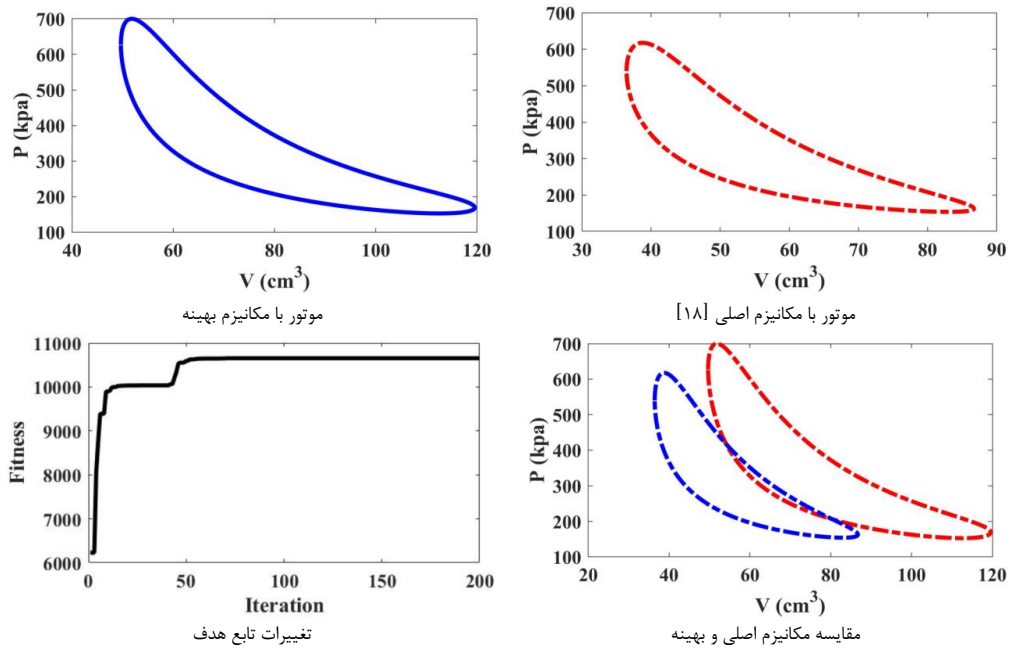
Fig. 11. Kinematic optimization result for Beta type with crankshaft using GA

- می‌توان دریافت که صرف‌نظر از سایر پارامترها، افزایش مقادیر l_1 و l_2 می‌تواند منجر به کاهش کار خروجی موتور شود.
- با توجه به استفاده از قید فضای اشغالی، اندازه ابعادی موتور از موتور اصلی بیشتر نشده‌است.
- ازدمام ذرات و رقابت استعماری، به ترتیب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده‌است.
- براساس نتایج جدول ۵ و شکل‌های ۸ تا ۱۰ می‌توان دریافت: طول عضوهای l_1 و l_2 به کمترین مقدار رسیده‌اند.



شکل ۱۲. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم ازدحام ذرات

Fig. 12. Kinematic optimization result for Beta type with crankshaft using PSO



شکل ۱۳. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم رقابت استعماری

Fig. 13. Kinematic optimization result for Beta type with crankshaft using ICA

- کار خروجی مکانیزم‌های بهینه‌شده با استفاده از سه روش بهینه‌سازی تقریباً ۲ برابر بیشتر از مکانیزم اصلی است.
- الگوریتم ازدحام ذرات برای این نوع از موتور استرلینگ، بهترین نتیجه را بین سه روش بهینه‌سازی کسب کرده‌است.

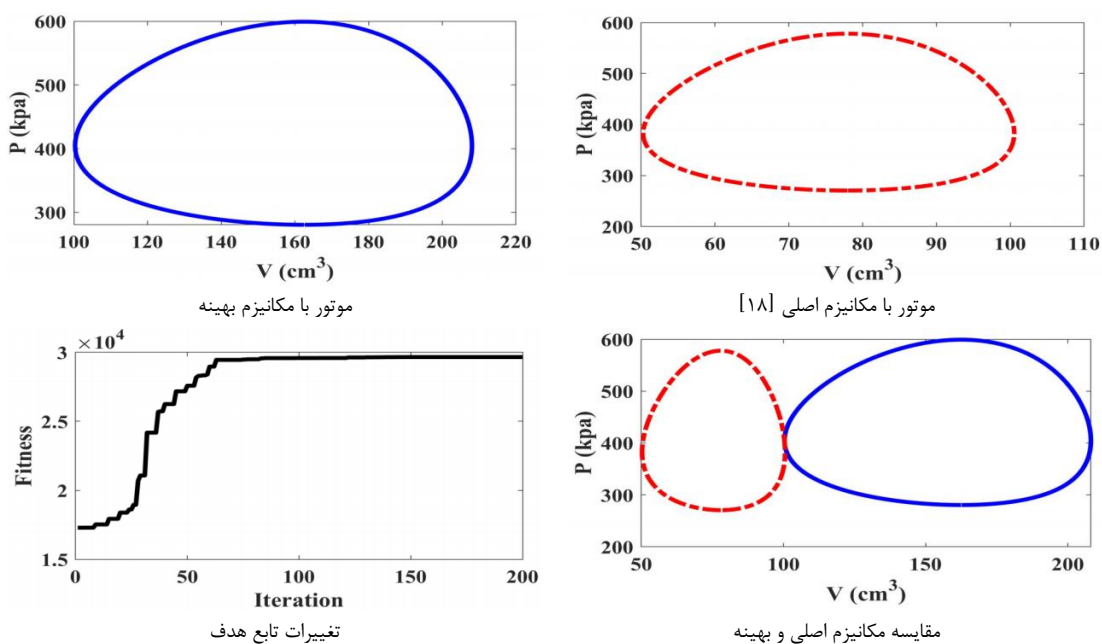
۲-۶- موتور بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

برای موتور نوع بتا، نتایج عددی طرح‌های بهینه با استفاده از تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی در جدول ۶ و نمودارهای $P-V$ برای موتورهای اصلی و بهینه، مقایسه بین آن‌ها، و تغییر در مقادیر عملکرد هدف

جدول ۷. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی برای موتور نوع گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

Table 7. Kinematic optimization result for Gama type engine with crankshaft mechanism

مقادیر بهینه	مقادیر بهینه	مقادیر بهینه	مقادیر اصلی	
الگوریتم رقابت	الگوریتم ازدحام	الگوریتم ژنتیک	مرجع [۱۸]	
استعماری	ذرات			
۶/۴۸	۵/۳۲	۶/۵۰	۱۰	l_1 (cm)
۵/۲۸	۳	۳	۱۰	l_2 (cm)
۳/۰۵	۳/۸۲	۵/۰۱	۶/۵	c_2 (cm)
۳/۱۷	۲/۴۱	۲/۹۹	۲	$r_1 = r_2$ (cm)
۲/۲۹	۲/۷۷	۲/۳۹	۲	E_r (cm)
۲/۲۱	۲/۶۷	۲/۳۰	۲	D_r (cm)
۲۷۰۳۶/۹۳	۳۰۹۷۴/۵۴	۲۹۶۵۸/۴۷	W_0	W (kg (cm/s) ²)
			=۱۱۹۳۵/۰۶	
۲/۲۶	۲/۵۹	۲/۴۸	۱	W / W_0



شکل ۱۴. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم ژنتیک

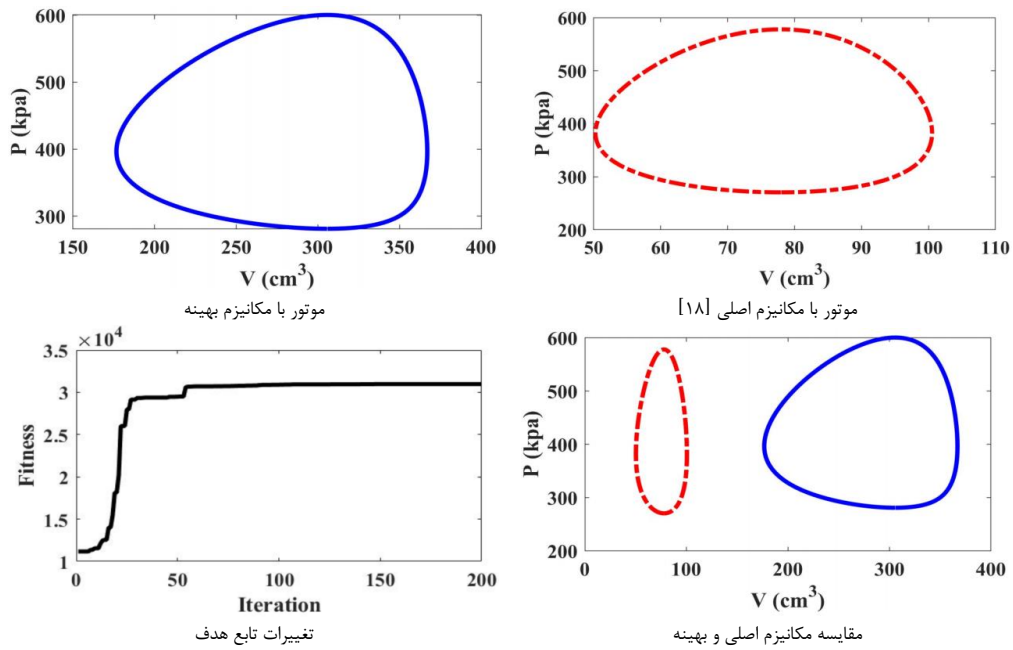
Fig. 14. Kinematic optimization result for Gama type with crankshaft using GA

• بدون در نظر گرفتن سایر پارامترها، افزایش مقدار $r_1 = r_2$ می‌تواند منجر به کار خروجی بیشتری شود.

• با وجود محدودیت مکان اشغالی، کار خروجی مکانیزم‌های بهینه‌شده با استفاده از سه روش بهینه‌سازی حدود ۱/۵ برابر بیشتر از

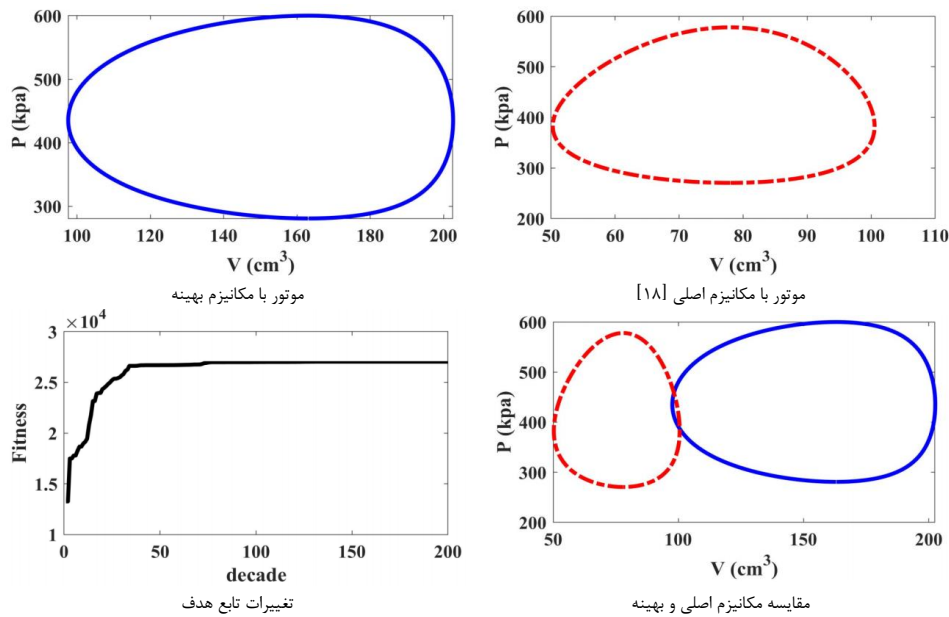
برای تکرارهای مختلف، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و رقابت استعماری به ترتیب در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است.

برای بهینه‌سازی موتور بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده، نتایج عددی نشان می‌دهد:



شکل ۱۵. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم ازدحام ذرات

Fig.15. Kinematic optimization result for Gama type with crankshaft using PSO



شکل ۱۶. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده با الگوریتم رقابت استعماری

Fig. 16. Kinematic optimization result for Gama type with crankshaft using ICA

۳-۶- گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده

مکانیزم اصلی است.

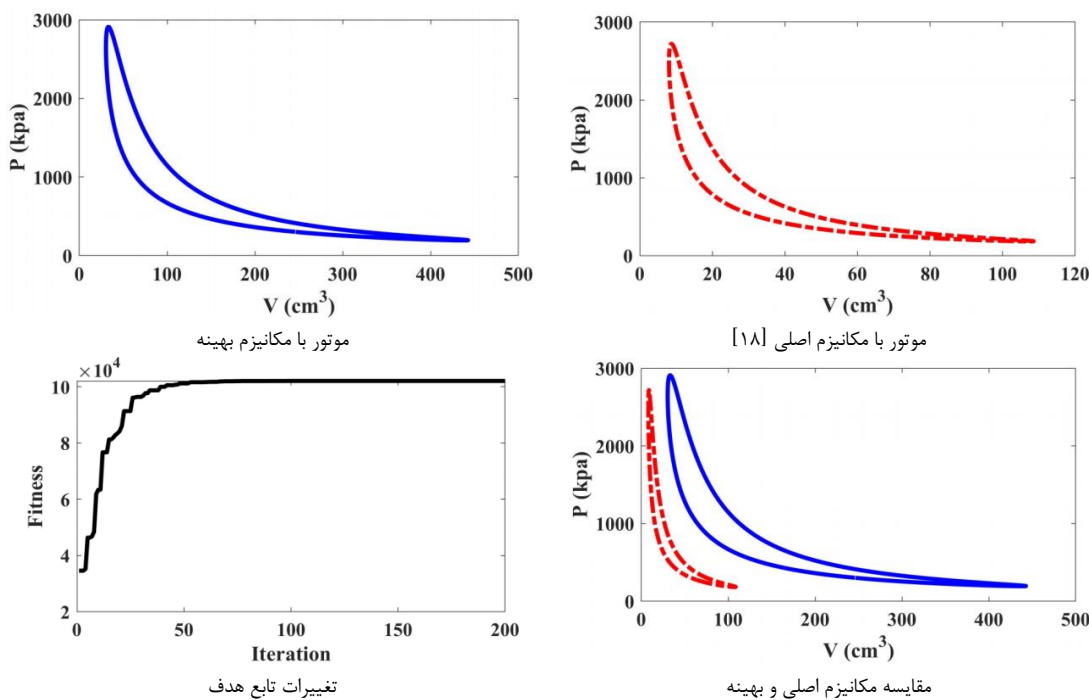
نتایج عددی بهینه‌های نوع گاما در جدول ۷ نشان داده شده است. نمودار فشار-حجم برای موتورهای اصلی و بهینه، مقایسه بین آن‌ها و تغییر در مقادیر تابع هدف برای هر تکرار، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک،

روش ازدحام ذرات بهترین نتیجه را در بین سه روش بهینه‌سازی برای این طرح از موتور استرلینگ دارد.

جدول ۸. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی برای موتور نوع آلفا با مکانیزم راس‌یاک

Table 8. Kinematic optimization result for Alpha type engine with Ross-Yoke mechanism

مقادیر بهینه الگوریتم رقابت استعماری	مقادیر بهینه الگوریتم ازدحام ذرات	مقادیر بهینه الگوریتم ژنتیک	مقادیر اصلی مرجع [۱۸]	
۵/۳۶	۵	۵/۱۵	۱۰	l_1 (cm)
۶/۱۴	۵/۱۹	۵/۴۳	۱۰	l_2 (cm)
۲/۴۳	۲/۲۵	۲/۳۲	۲	r_1 (cm)
۴	۴	۴	۲	E_r (cm)
۳۰/۶	۳/۷۰	۳/۴۷	۲	C_r (cm)
۱۰۱۲۴۹/۶۹	۱۰۰۹۹۶/۳۰	۱۰۲۰۷۱/۵۷	$W_0 =$ ۲۲۲۱۸/۶۰	W (kg (cm/s) ²)
۴/۵۵	۴/۵۴	۴/۵۹	۱	W / W_0



شکل ۱۷. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی آلفا با مکانیزم راس‌یاک با الگوریتم ژنتیک
Fig. 17. Kinematic optimization result for Alpha type with Ross-Yoke using GA

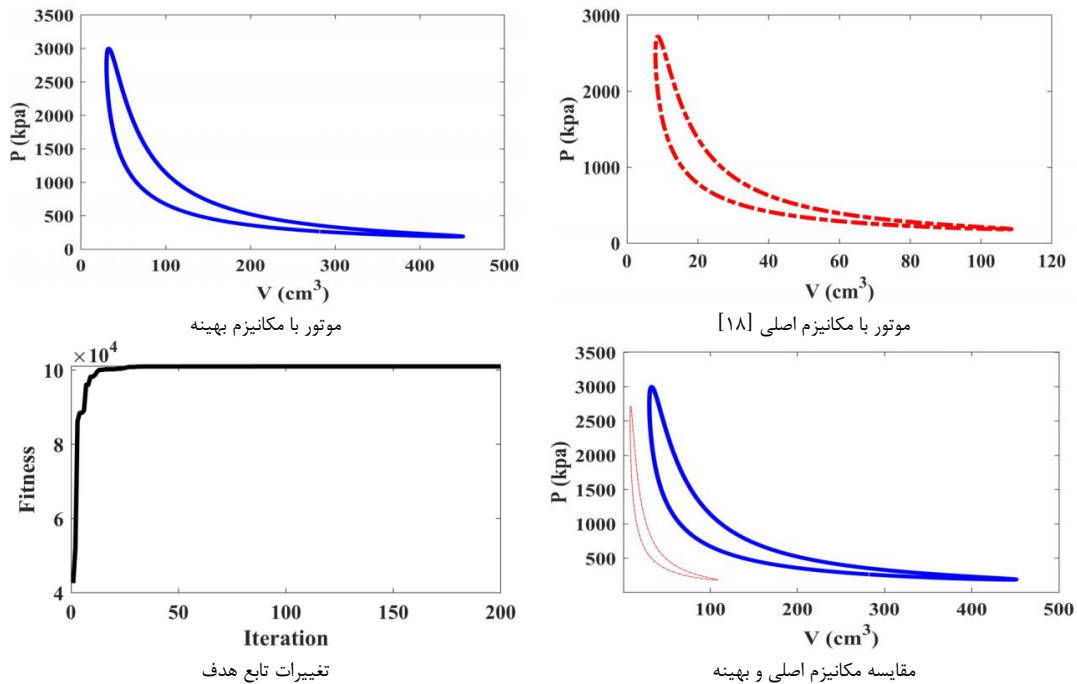
ازدحام ذرات و رقابت استعماری، به ترتیب در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده‌است. همچنین نتایج با مقادیر اصلی مرجع [۱۸] مقایسه شده‌اند. مقادیر بهینه داده‌ها در جدول ۷ برای موتور استرلینگ گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده نشان می‌دهد:

- مقدار کار خروجی بهتری دست یافته‌است.
- حتی با اعمال محدودیت مکان اشغالی، کار خروجی

اما E_r و D_r با هم افزایش یابند، می‌تواند منجر به کار بیشتر شود. اگر D_r به تنهایی افزایش یابد، باعث کاهش کار خروجی می‌شود.

روش ازدحام ذرات با به حداقل رساندن مقادیر C_2 و l_2 به

- با چند آزمایش در مورد شعاع پیستون‌ها معلوم گردید اگر



شکل ۱۸. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی بیکربندی آلفا با مکانیزم راس‌یاک با الگوریتم ازدحام ذرات
 Fig. 18. Kinematic optimization result for Alpha type with Ross-Yoke using PSO

استفاده از سه روش بهینه‌سازی تقریباً ۴/۵ برابر بیشتر از مکانیزم اصلی است.

• برای این نوع از موتور استرلینگ، الگوریتم ژنتیک بهترین نتیجه را بین سه روش بهینه‌سازی کسب کرده‌است.

۵-۶- مقایسه روش‌های بهینه‌سازی

مقایسه‌ای بین سه روش بهینه‌سازی برای چهار نوع مختلف موتور استرلینگ در شکل ۲۰ نشان داده شده‌است. این مقایسه نشان می‌دهد:

- الگوریتم ازدحام ذرات در سه مورد به بهترین نتایج دست یافته‌است و در یک مورد نیز الگوریتم ژنتیک بهترین بوده‌است.
- با توجه به قدمت و توانمندی دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک، روش رقابت استعماری علی‌رغم جدیدتر بودن توانسته نتایج قابل قبول و قابل مقایسه‌ای را با دو روش دیگر کسب کند.
- مدل آلفا با مکانیزم راس‌یاک بهترین بهبود و افزایش کار خروجی را در اثر بهینه‌سازی سینماتیکی نسبت به سایر طرح‌ها داشته‌است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی سنتز ابعادی موتور استرلینگ، با

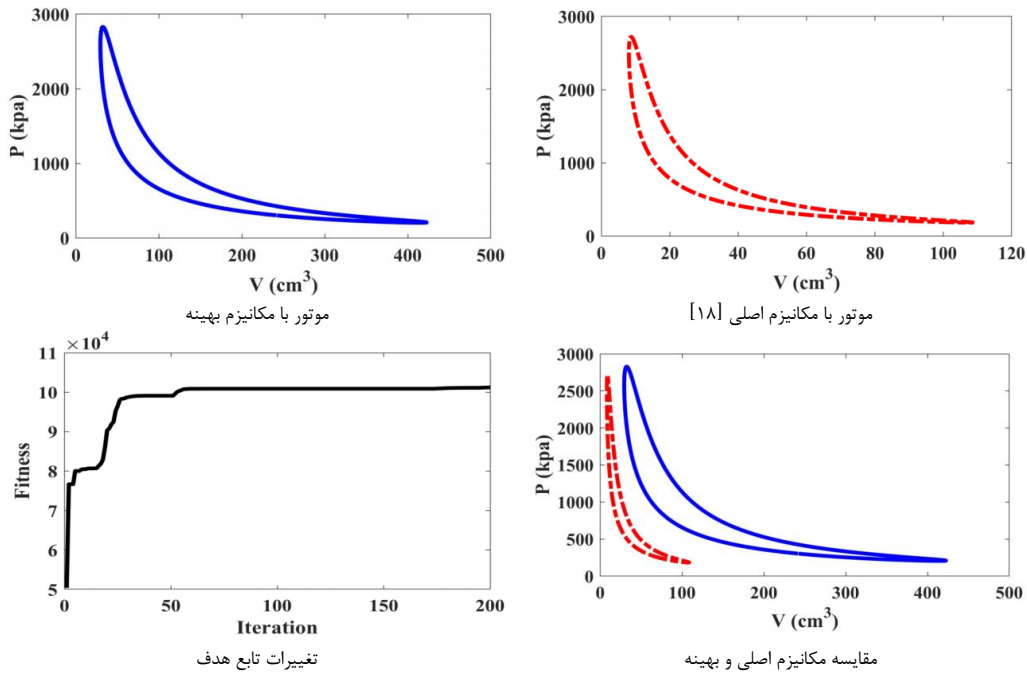
مکانیزم‌های بهینه‌شده با استفاده از سه روش بهینه‌سازی حدود ۲/۵ برابر بیشتر از مکانیزم اصلی می‌باشد.

• روش ازدحام ذرات بهترین نتیجه را در بین سه روش بهینه‌سازی برای این طرح از موتور استرلینگ دارد.

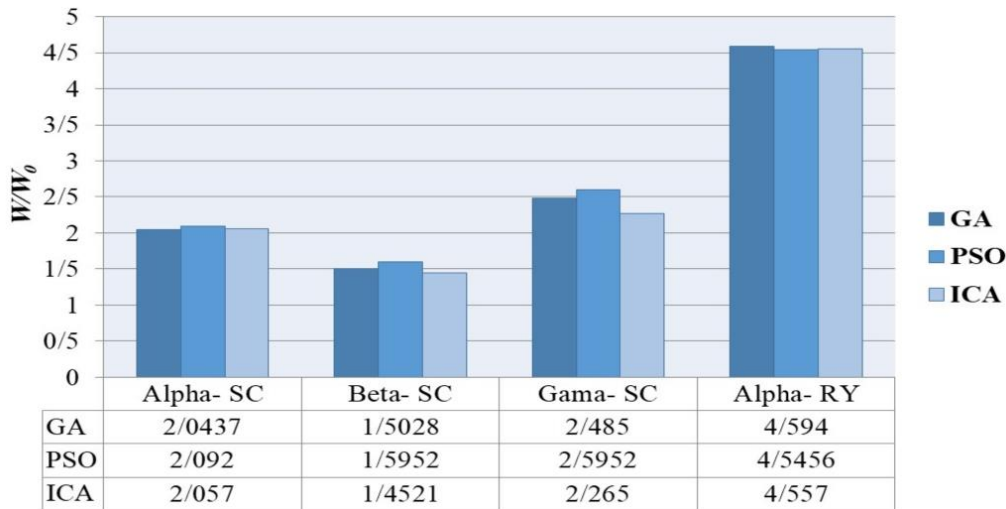
۴-۶- آلفا با مکانیزم راس‌یاک

نتایج بهینه‌سازی این چیدمان در جدول ۸ نشان داده شده‌است. همچنین نمودار $P-V$ برای موتورهای اصلی و بهینه، مقایسه بین آن‌ها، و تغییر در مقادیر تابع هدف برای تکرارهای مختلف، با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌سازی در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ نشان داده شده‌است نکات مهم بهینه‌سازی بیکربندی نوع آلفا با مکانیزم راس‌یاک براساس نتایج به شرح زیر است:

- شعاع پیستون انقباض E_r به بیشترین مقدار مجاز خود رسیده‌است.
- مقادیر l_1 و l_2 تقریباً به کمترین مقادیر مجاز خود رسیده‌اند.
- علی‌رغم اعمال قید محدودیت فضای اشغالی، که مانع از افزایش سایز موتور می‌شود، کار خروجی موتورهای بهینه‌شده با



شکل ۱۹. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی پیکربندی آلفا با مکانیزم راس‌یاک با الگوریتم رقابت استعماری
 Fig. 19. Kinematic optimization result for Alpha type with Ross-Yoke using ICA



شکل ۲۰. مقایسه سه روش بهینه‌سازی
 Fig. 20. Comparison of three optimization methods

گرفته شده است. با استفاده از این قید جدید، از افزایش نامتعارف سایز موتور پیشگیری می‌شود. هدف از بهینه‌سازی نیز افزایش کار خروجی موتور استرلینگ بوده است. این مسئله بهینه‌سازی برای طرح‌های مختلف و با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، ازدحام ذرات و رقابت استعماری حل شده است. نتایج نشان می‌دهند:

- صرف نظر از پارامترهای دیگر، افزایش مقدار طول میل‌لنگ،

در نظر گرفتن چهار چیدمان مختلف (آلفا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده، بتا با مکانیزم لنگ‌ولغزنده، گاما با مکانیزم لنگ‌ولغزنده، آلفا با مکانیزم راس‌یاک) پرداخته شده است. متغیرهای طراحی این مساله بهینه‌سازی شامل پارامترهای هندسی مانند طول لینک‌ها و شعاع پیستون‌ها بوده‌اند. علاوه بر مقادیر حداکثر و حداقل فشار کاری، مقادیر بیشینه فضای اشغالی موتور نیز به عنوان یکی از قیود مساله در نظر

R	ثابت جهانی گازها ((cm ³ .kPa)/(K.mol))
$r_1 = r_2$	شعاع میل لنگ (cm)
T	دمای مطلق گاز (K)
T_c	دمای انقباض (K)
T_e	دمای انبساط (K)
T_{room}	دمای اتاق (K)
V	حجم (cm ³)
V_c	حجم انقباض (cm ³)
V_e	حجم انبساط (cm ³)
V_{max}	حجم بیشینه موتور (cm ³)
W	کار خروجی (kg(cm/s) ²)
W_0	کار خروجی موتور اصلی (kg(cm/s) ²)
x	بردار متغیرهای طراحی
x_{max}	حد بالایی مقادیر متغیرهای طراحی
x_{min}	حد پایینی مقادیر متغیرهای طراحی

علائم یونانی

α	زاویه فاز موتور (°)
θ	زاویه دوران لنگ (°)

مراجع

- [1] M.H. Ahmadi, H. Hosseinzade, H. Sayyaadi, A.H. Mohammadi, F. Kimiaghalam, Application of the multi-objective optimization method for designing a powered Stirling heat engine: design with maximized power, thermal efficiency and minimized pressure loss, *Renewable Energy*, 60 (2013) 322-313.
- [2] M.H. Ahmadi, A.H. Mohammadi, S. Dehghani, Evaluation of the maximized power of a regenerative endoreversible Stirling cycle using the thermodynamic analysis, *Energy Conversion and Management*, 76 (2013) 570-561.
- [3] M.H. Ahmadi, A.H. Mohammadi, S. Dehghani, M.A. Barranco-Jimenez, Multi-objective thermodynamic-based optimization of output power of Solar Dish-Stirling engine by implementing an evolutionary algorithm, *Energy conversion and Management*, 75 (2013) 445-438.
- [4] G. Walker, *Stirling engines*, (1980).
- [5] T. Finkelstein, *Air engines: the history, science, and reality of the perfect engine/Theodor Finkelstein*, Allan J, Organ, (2001).
- [6] G. Schmidt, *The theory of Lehmann's calorimetric*

منجر به کار خروجی بالاتر می‌شود. زیرا با افزایش این پارامتر، مقادیر کورس پیستون‌ها افزایش یافته و این امر کار خروجی بیشتری را منجر می‌شود.

- فارق از اثر سایر پارامترها، افزایش طول شاتون در مکانیزم لنگ‌ولغزنده منجر به کاهش کار خروجی موتور می‌شود.

- اگر شعاع پیستون‌های انبساط و انقباض با هم زیاد شده باشند، کار خروجی موتور بهبود می‌یابد. اما افزایش در یکی از دو شعاع نتیجه خوبی نداشته‌است.

- موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم راس‌یاک، برای به‌حداکثر رساندن کار خروجی بر اساس تغییر پارامترهای هندسی، بهترین نتیجه را نسبت به چیدمان‌های دیگر داشته‌است. دلیل این امر نیز تفاوت‌های موجود بین زنجیره‌های سینماتیکی مکانیزم راس‌یاک و مکانیزم لنگ و لغزنده می‌باشد.

- دو موتور استرلینگ با فضای اشغالی یکسان می‌تواند کارهای خروجی متفاوتی داشته باشند. بنابراین همواره می‌توان در یک فضای مشخص، بهترین ابعاد موتور را پیدا کرده تا بیشترین کار خروجی موتور حاصل گردد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_1	طول میله پیستون (cm)
C_2	طول میله پیستون (cm)
C_r	شعاع پیستون انقباض (cm)
D_r	شعاع پیستون جابجایی (cm)
E_r	شعاع پیستون انبساط (cm)
h	گرم‌کن
l_1	طول میله اتصال (cm)
l_2	طول میله اتصال (cm)
mol	جرم مولار گاز
OS	فضای اشغالی موتور (cm ³)
OS_{max}	بیشینه مقدار مجاز فضای اشغالی موتور (cm ³)
P	فشار مطلق گاز (kPa)
P_{max}	بیشینه مقدار مجاز فشار (kPa)
P_{mean}	فشار مطلق موتور در شرایط استاتیکی (kPa)
P_{min}	کمینه مقدار مجاز فشار (kPa)

- using third order analysis, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014) 529-521.
- [16] C. Duan, X. Wang, S. Shu, C. Jing, H. Chang, Thermodynamic design of Stirling engine using multi-objective particle swarm optimization algorithm, *Energy Conversion and Management*, 84 (2014) 96-88.
- [17] G. Xiao, U. Sultan, M. Ni, H. Peng, X. Zhou, S. Wang, Z. Luo, Design optimization with computational fluid dynamic analysis of β -type Stirling engine, *Applied Thermal Engineering*, 113 (2017) 102-87.
- [18] J. Egas, D.M. Clucas, Stirling engine configuration selection, *Energies*, 3(11) (2018) 584.
- [19] A. Rahmati, S. Varedi-Koulaei, M. Ahmadi, H. Ahmadi, Dimensional synthesis of the Stirling engine based on optimizing the output work by evolutionary algorithms, *Energy Reports*, 6 (2020) 1486-1468.
- [20] H. Hachem, R. Gheith, F. Aloui, S.B. Nasrallah, Technological challenges and optimization efforts of the Stirling machine: A review, *Energy conversion and management*, 171 (2018) 1387-1365.
- [21] D. Thombare, S. Verma, Technological development in the Stirling cycle engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(12) (2008) 38-1.
- [22] S.S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*, John Wiley & Sons, 2019.
- [23] A. Sardashti, H. Daniali, S. Varedi, Optimal free-defect synthesis of four-bar linkage with joint clearance using PSO algorithm, *Meccanica*, 7(48) (2013) 1693-1681.
- [24] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, in: 2007 IEEE congress on evolutionary computation, Ieee, 2007, pp. 4667-4661.
- machine, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1(15) (1871) 112-98.
- [7] I. Urieli, D.M. Berchowitz, *Stirling cycle engine analysis*, A. Hilger Bristol, UK, 1984.
- [8] M. Babaelahi, H. Sayyaadi, Simple-II: a new numerical thermal model for predicting thermal performance of Stirling engines, *Energy*, 69 (2014) 890-873.
- [9] C. Cheng, Y. Chen, Numerical simulation of thermofluid dynamics of a 1-kW beta-type Stirling engine”, in: *The 9th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (ACEX2015)*, June 29 to July 2, 2015, Munich, Germany, 2005.
- [10] J.L. Salazar, W.-L. Chen, A computational fluid dynamics study on the heat transfer characteristics of the working cycle of a β -type Stirling engine, *Energy conversion and management*, 88 (2014) 188-177.
- [11] C.-H. Cheng, Y.-J. Yu, Dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models, *Renewable energy*, 2(36) (2011) 725-714.
- [12] C.-H. Cheng, Y.-J. Yu, Combining dynamic and thermodynamic models for dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism, *Renewable energy*, 1(37) (2012) 173-161.
- [13] L. Scollo, P. Valdez, S. Santamarina, M. Chini, J. Baron, Twin cylinder alpha stirling engine combined model and prototype redesign, *International journal of hydrogen energy*, 4(38) (2013) 1996-1988.
- [14] M. Afzali Ashkezari, *Dynamic analysis of a v-type slider-crank mechanism in Stirling engine*, Tarbiat Modares University, Iran, 2014 (in Persian).
- [15] S. Toghiani, A. Kasaeian, S.H. Hashemabadi, M. Salimi, Multi-objective optimization of GPU3 Stirling engine

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Rahmati, S.M. Varedi-Koulaei, H. Ahmadi, M.H. Ahmadi, *Kinematic Optimization of the Stirling engine for Maximum Output Work and Constraint of Occupied Space*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(7) (2021) 4455-4480.

DOI: [10.22060/mej.2020.18822.6900](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18822.6900)

