

سلام الله عليكم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

تحلیل سینماتیکی موتور استرلینگ نوع آلفا براساس مفهوم نسبت تراکم متغیر

نگارنده: متینه فرخی نیا

استاد راهنما:

دکتر سید مجتبی واردی کولایی

استاد مشاور:

دکتر محمد حسین احمدی

مهر ۱۴۰۰

تقدیم به

ارزشمندترین سرمایه های زندگی

پدر و مادرم

سپاس و ستایش یزدان پاک را که رهتوشه دانش در کوله بار اشرف آفریدگان خویش نهاد و با کرامت علم السما و را شایستگی مقام خلیفه الهی ارزانی داشت.

بر خود می دانم از زحمات بی دریغ استاد راهنمای خود جناب آقای دکتر کولایی که با صبر و گذشت از کمبودها و کاستی های در حین کار این حقیر چشم پوشی نموده و همواره مشوقی برای ادامه کار بوده اند تشکر نمایم. باشد که در آینده ذره ای قدردان راهنمایی ها و زحمات ایشان باشم.

همچنین مراتب سپاس گذاری و قدردانی بی پایان خود را از ارشادات و هدایت های استاد محترم جناب آقای دکتر احمدی که به عنوان استاد راهنمای دوم این پایان نامه تحصیلی، دستگیر و راه گشای این جانب بودند، می نمایم.

در پایان از درگاه ایزد منان، سربلندی این اساتید فاضل، دانشمند و بزرگوار را خواستارم.

تهدنامه

اینجانب متینه فرخی نیا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکترونیک دانشکده مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل سینماتیکی موتور استرلینگ نوع آلفا براساس مفهوم نسبت تراکم متغیر تحت راهنمایی دکتر سید مجتبی وادی کولایی و دکتر محمد حسین احمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است..

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پژوهش با تمرکز بر روی پیکربندی آلفا در موتور استرلینگ، به طراحی حالت نسبت تراکم متغیر آن، یعنی جابجایی لولای اصلی پرداخته شده است. در موتور نسبت تراکم متغیر، می-توان با تغییر مکان نقطه‌ای از موتور، و بدون تغییر در طول‌های هندسی اعضای آن، رفتار و خروجی موتور را تغییر داد. در این پژوهش با تغییر مکان لولای لنگ موتور، به بررسی رفتار آن پرداخته شده است. متغیرهای طراحی مساله با توجه به هندسه موتور و نحوه تغییر در ساختار آن مشخص شده و برای حل مساله بهینه‌سازی از الگوریتم ازدحام ذرات و شیرمورچه استفاده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین برای نوشتن برنامه دو الگوریتم، از نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. نتایج این پژوهش شامل دو قسمت می‌باشد که ابتدا مفهوم نسبت تراکم متغیر با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی ذکر شده کار خروجی بهینه بدست آمده است. در قسمت دوم مطالعات این پژوهش نیز به بهینه‌سازی تمامی پارامترهای هندسی موتور پرداخته شده است. نتایج این پژوهش حاکی از بهتر بودن کار خروجی موتور نسبت تراکم متغیر نسبت به موتور اصلی با نسبت تراکم ثابت است. بدین‌صورت که کار خروجی در این حالت تقریباً ۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که کار خروجی بهینه‌شده توسط الگوریتم شیر مورچه تا حدودی بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. در پایان نیز نتایج نشان داد که در حالت بهینه‌کردن تمامی پارامترهای هندسی موتور، کار خروجی تقریباً ۲/۵ برابر کار موتور اصلی می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، موتور استرلینگ نوع آلفا، الگوریتم شیرمورچه، الگوریتم ازدحام ذرات، نسبت تراکم متغیر.

فهرست مطالب

ی	فهرست جداول
ک	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات تحقیق
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- مکانیزم موتور استرلینگ
۳	۳-۱- انواع پیکربندی موتور استرلینگ بر اساس نحوه اتصال سیلندر
۳	۱-۳-۱- پیکربندی نوع α
۴	۲-۳-۱- پیکربندی نوع β
۴	۳-۳-۱- پیکربندی نوع γ
۵	۴-۱- انواع پیکربندی موتور استرلینگ براساس مکانیزم حرکتی
۵	۱-۴-۱- مکانیزم لنگ - لغزنده
۵	۲-۴-۱- مکانیزم لوزی
۶	۳-۴-۱- مکانیزم صفحه لنگ
۶	۴-۴-۱- مکانیزم راس یاک
۷	۵-۱- موتورهای نسبت تراکم متغیر
۱۰	۶-۱- بیان مسئله و روش تحقیق
۱۱	۷-۱- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق
۱۳	فصل ۲: مروری بر ادبیات پیشین
۱۴	۱-۲- مقدمه
۱۴	۲-۲- ادبیات پیشین
۲۹	۳-۲- نوآوری پژوهش
۳۱	فصل ۳: معادلات حاکم
۳۲	۱-۳- مقدمه
۳۲	۲-۳- معرفی تئوری اشمیت
۳۲	۱-۲-۳- فرضیات تئوری اشمیت
۳۳	۲-۲-۳- تئوری اشمیت برای موتور استرلینگ نوع α
۳۷	۳-۳- معادلات سینماتیکی موتور استرلینگ نوع α براساس تغییر مکان نقطه O

۴۱	۳-۴-۱- تغییر مکان لولای O در راستای محور x
۴۴	۳-۴-۲- تغییر مکان لولای O در راستای محور y
۴۷	۳-۴-۳- تغییر مکان لولای O در راستای خط O_1
۵۰	۳-۴-۴- تغییر مکان لولای O در راستای خط O_2
۵۳	فصل ۴: بهینه سازی و نتایج
۵۴	۴-۱- الگوریتم های بهینه سازی
۵۵	۴-۱-۱- الگوریتم ازدحام ذرات
۵۶	۴-۱-۲- الگوریتم بهینه سازی شیر مورچه (ALO)
۶۱	۴-۲- بهینه سازی حالت ۱: بهینه سازی موتور بر اساس مفهوم نسبت تراکم متغیر
۶۴	۴-۳- بهینه سازی حالت ۲: بهینه سازی کلی موتور
۷۱	فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۲	۵-۱- نتیجه گیری
۷۳	۵-۲- پیشنهادات
۷۵	منابع و ماخذ

فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱. اثر تغییرمکان افقی لولای O بر پارامترهای عملکردی موتور ۴۲
- جدول ۳-۲. اثر تغییرمکان قائم لولای O بر پارامترهای عملکردی موتور..... ۴۵
- جدول ۳-۳. اثر تغییرمکان لولای موردنظر در راستای خط O_1 بر پارامترهای عملکردی موتور... ۴۸
- جدول ۳-۴. اثر تغییرمکان لولای موردنظر در راستای خط O_2 بر پارامترهای عملکردی موتور... ۵۱
- جدول ۴-۱. مقادیر ثابت پارامترهای ترمودینامیکی [۴۴]..... ۵۴
- جدول ۴-۲. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم های بهینه سازی..... ۶۰
- جدول ۴-۳. محدوده مجاز تغییرات متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی حالت ۱ ۶۱
- جدول ۴-۴. مقادیر پارامترهای هندسی موتور [۴۴]..... ۶۲
- جدول ۴-۵. نتایج بهینه سازی برای موتور استرلینگ نوع آلفا در حالت ۱ ۶۲
- جدول ۴-۶. محدوده مجاز متغیرهای طراحی جهت بهینه سازی در حالت ۲ ۶۶
- جدول ۴-۷. نتایج بهینه سازی در حالت ۲ برای موتور استرلینگ نوع آلفا. ۶۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. انواع موتور استرلینگ از نظر چیدمان سیلندر. ۴
- شکل ۱-۲. انواع موتور استرلینگ از نظر مکانیزم حرکتی. ۶
- شکل ۱-۲. سینماتیک ST500. ۱۸
- شکل ۲-۲. شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم رانندگی لوزی. ۱۹
- شکل ۳-۲. شماتیک موتور استرلینگ نوع آلفا. ۲۰
- شکل ۴-۲. موتور استرلینگ نوع بتا. ۲۲
- شکل ۵-۲. شماتیک مکانیزم شیاو و همکاران. ۲۳
- شکل ۶-۲. (a) نمودار شماتیک، (b) نمونه اصلی. ۲۴
- شکل ۷-۲. نمای شماتیک مکانیسم. ۲۵
- شکل ۸-۲. نمودار شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم محرک بادامک. ۲۶
- شکل ۹-۲. شماتیک موتور استرلینگ با مکانیزم لوزی. ۲۷
- شکل ۱-۳. نمایی شماتیک از موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم لنگ و لغزنده. ۳۷
- شکل ۲-۳. اثر تغییرات x بر V_{min} . ۴۳
- شکل ۳-۳. اثر تغییرات x بر V_{max} . ۴۳
- شکل ۴-۳. اثر تغییرات x بر P_{min} . ۴۳
- شکل ۵-۳. اثر تغییرات x بر P_{max} . ۴۳
- شکل ۶-۳. اثر تغییرات x بر W . ۴۳
- شکل ۷-۳. اثر تغییرات y بر V_{min} . ۴۶
- شکل ۸-۳. اثر تغییرات y بر V_{max} . ۴۶
- شکل ۹-۳. اثر تغییرات y بر P_{min} . ۴۶
- شکل ۱۰-۳. اثر تغییرات y بر P_{max} . ۴۶
- شکل ۱۱-۳. اثر تغییرات y بر W . ۴۶
- شکل ۱۲-۳. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر V_{min} . ۴۹
- شکل ۱۳-۳. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر V_{max} . ۴۹
- شکل ۱۴-۳. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر P_{min} . ۴۹
- شکل ۱۵-۳. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر P_{max} . ۴۹
- شکل ۱۶-۳. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر W . ۴۹

شکل ۳-۱۷. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر V_{min}	۵۲
شکل ۳-۱۸. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر V_{max}	۵۲
شکل ۳-۱۹. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر P_{min}	۵۲
شکل ۳-۲۰. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر P_{max}	۵۲
شکل ۳-۲۱. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر W	۵۲
شکل ۴-۱. فلوجارت الگوریتم PSO	۵۶
شکل ۴-۲. فلوجارت الگوریتم ALO	۶۰
شکل ۴-۳. نتایج بهینه سازی با الگوریتم PSO برای حالت ۱	۶۳
شکل ۴-۴. نتایج بهینه سازی با الگوریتم ALO در حالت ۱	۶۴
شکل ۴-۵. نتایج بهینه سازی در حالت ۲ با الگوریتم PSO	۶۸
شکل ۴-۶. نتایج بهینه سازی در حالت ۲ با الگوریتم ALO	۶۹

فصل ۱: کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

در دنیای در حال توسعه امروز و با رشد روز افزون تکنولوژی، اکثر کارها با دقت و سرعت بالاتر توسط ماشین ها انجام می گردد. با توجه به ماشینی شدن کارها و گسترش فناوری های جدید، استفاده از انرژی در حال افزایش است. امروزه اکثر انرژی مصرفی جهان از سوخت های فسیلی و غیرقابل تجدیدپذیر تهیه می گردد. این در حالی است که این سوخت ها 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 سوخت های فسیلی کند. در چنین شرایطی است که انرژی های نوین منبع اصلی انرژی جهان می شود. در راستای تحقق این امر یکی از سیستم هایی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته اند، موتورهای پاک و از جمله آن ها موتورهای استرلینگ هستند و موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی با چرخه بسته است که سیال عامل موتور هرگز آن را ترک نمی کند، دارای صدای کم است، و به راحتی می تواند از انواع سوخت ها مانند انرژی خورشیدی، انرژی رادیوایزوتوپ، انرژی زمین گرمایی و بسیاری از سوخت های نوین دیگر استفاده کند [۱-۳]. این موتور سیکل ترمودینامیکی بسته ای 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 محدودیت هایی مانند روانکاری و آب بندی سخت نیز وجود دارد. در این فصل به بررسی و مطالعه انواع این موتور و بیان مسئله و اهمیت و ضرورت انجام تحقیق پرداخته خواهد شد.

۲-۱- مکانیزم موتور استرلینگ

موتور استرلینگ از یک حجم گرم و یک حجم سرد که از طریق بازیاب حرارت و دو مبدل حرارتی به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل شده است. 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 [۵-۶]:

✓ چیدمان سیلندرها نسبت به یکدیگر

✓ مکانیزم حرکتی موتور

۳-۱- انواع پیکربندی موتور استرلینگ بر اساس نحوه اتصال

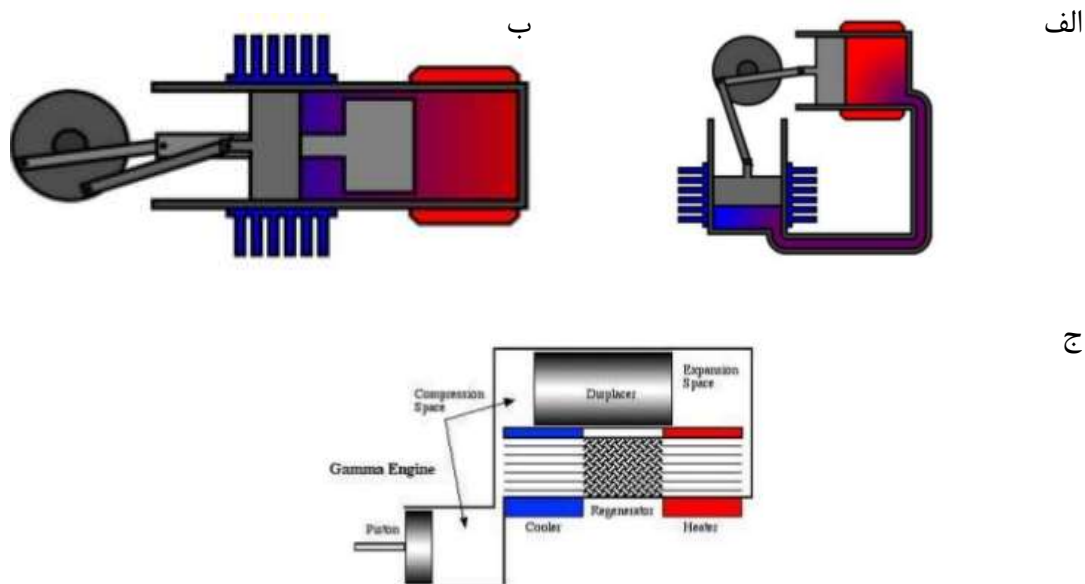
سیلندر

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

۱-۳-۱- پیکربندی نوع آلفا α

موتور استرلینگ نوع آلفا (شکل ۱-۱ 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 هم زمان وظیفه انبساط و انقباض سیال و وظیفه انتقال سیال را بین محفظه‌های گرم و سرد بر عهده دارند [۶-۷].



شکل ۱-۱. انواع موتور استرلینگ از نظر چیدمان سیلندر [۷].

۱-۳-۲- پیکربندی نوع بتا β

استرلینگ نوع بتا (شکل ۱-۱-ب)، اولین نوع پیکربندی است که استرلینگ در سال ۱۸۱۶ میلادی ابداع کرده است. 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 جابه‌جا کننده نامیده می‌شود.

۱-۳-۳- پیکربندی نوع گاما γ

استرلینگ نوع گاما (شکل ۱-۱-ج)، در حقیقت مشابه پیکربندی نوع بتا است؛ با این تفاوت که در آن پیستون قدرت و پیستون جابجاکننده، هر کدام سیلندر جداگانه دارند و سیال، بین دو

سیلندر جریان می‌یابد [۷-۶]. هر یک از پیکربندی‌های ذکر شده می‌توانند دارای مکانیزم حرکتی متفاوتی باشند که در ادامه به تشریح آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱- 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 شده است. موتورهای استرلینگ را می‌توان با توجه به مکانیزم حرکتی آنها به چندین قسمت دسته بندی نمود.

۱-۴-۱- مکانیزم لنگ - لغزنده

مکانیزم لنگ - لغزنده (شکل ۱-۲-الف) مدت‌هاست که در موتورهای احتراق داخلی بکارگیری می‌شود و بسیار مناسب و قابل اعتماد 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 [۷-۶].

۱-۴-۲- مکانیزم لوزی

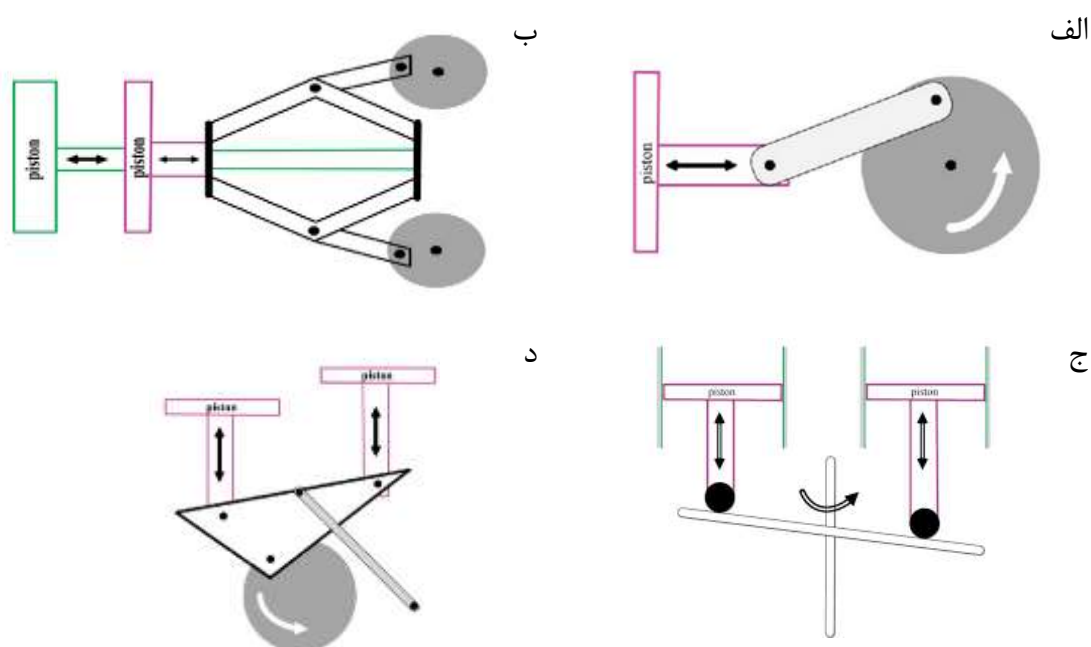
مکانیزم لوزی اولین بار در سال ۱۹۵۰ میلادی توسط شرکت فیلیپس معرفی شد. این مکانیزم شناخته شده‌ترین و پیشرفته‌ترین مکانیزم برای موتورهای استرلینگ تک سیلندر است. در شکل ۱-۲-ب به خوبی مشاهده می‌شود که این مکانیزم دارای اعضای متحرک و سطوح لغزشی فراوانی است. اگر چه مکانیزم ساختار نسبتاً پیچیده‌ای دارد ولی در عوض دارای توازن دینامیکی است [۷-۶].

۱-۴-۳- مکانیزم صفحه لنگ

مکانیزم صفحه لنگ یکی دیگر از مکانیزم‌های مورد استفاده در موتور استرلینگ می‌باشد که در شکل ۱-۲-ج نشان داده شده است. همان‌طور که اسم آن گویاست دارای یک صفحه دوار است که با استفاده از آن، حرکت خطی رفت و برگشتی 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.

۱-۴-۴- مکانیزم راس یاک

مکانیزم راس یاک (شکل ۱-۲-د) را نخستین بار آقای راس در سال ۱۹۷۹ میلادی با هدف استفاده در موتور استرلینگ نوع آلفا در دانشگاه کمبریج انگلستان معرفی کرد. مکانیزم راس یاک بارهای جانبی روی پیستون‌ها و میله‌های اتصال را کاهش می‌دهد و اغلب در موتورهای نوع آلفا برای کاهش نیروی اصطکاک استفاده می‌گردد [۶-۷].



شکل ۱-۲. انواع موتور استرلینگ از نظر مکانیزم حرکتی [۷].

۱-۵- موتورهای نسبت تراکم متغیر

با افزایش گسترده تقاضای استفاده از موتورهای احتراق جرقه‌ای، آلودگی هوا در اثر ورود محصولات احتراق به محیط، به عنوان یکی از مشکلات بزرگ این موتورها به شمار می‌آید. البته در طول چهل سال گذشته، فشارهای وارده از سوی دولت‌ها و فعالیتهای تحقیقاتی انجام شده باعث شد تا میزان آلاینده‌هایی مانند NO_x ، CO و HC تا حد زیادی کم شود. از طرف دیگر، با افزایش استفاده از موتورهای احتراق جرقه‌ای میزان گاز CO_2 خروجی از این موتورها نیز به مقدار چشمگیری افزایش یافته است. اگر چه این گاز به طور مستقیم به سلامت انسان ضرر نمی‌رساند، ولی از مهم‌ترین گازهایی است که در افزایش اثر گلخانه‌ای دخالت دارد. لذا می‌توان امیدوار بود با تحقیقاتی که انجام خواهد گرفت، در آینده میزان CO_2 خروجی از این نوع موتورها تا حد زیادی محدود شود. این امر با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی میسر می‌شود. یعنی افزایش استفاده از موتورهای احتراقی با سوخت‌های جایگزین نظیر هیدروژن و پایین آوردن کربن موجود در سوخت‌های هیدروکربنی و یا کاهش مصرف سوخت با بالا بردن راندمان موتورهای احتراق داخلی [۸].

حال این سؤال مطرح است که چگونه می‌توان مصرف سوخت را کاهش داد؟ پاسخ افزایش راندمان حرارتی می‌باشد. با افزایش راندمان، مصرف سوخت کاهش یافته، در نتیجه می‌توان از منابع نفت خام مدت زمان بیشتری استفاده نمود. این برای دارنده اتومبیل نیز یک مزیت است، چون با پرداخت هزینه کمتر، مسافت بیشتری را طی می‌کند [۹]. در این صورت، کاهش مصرف سوخت بدین مفهوم است که محصولات احتراق کمتری تولید خواهد شد. در نتیجه به سلامت محیط زیست کمک می‌شود.

موتورهای با نسبت قشرده سازی متغیر^۱، یکی از جدیدترین فن‌آوری‌هایی است که جهت افزایش افزایش راندمان بکار گرفته شده است. این سامانه با افزایش راندمان به خصوص در حالت نیمه‌بار، راندمان را افزایش داده و مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. طراحی موتورهای نسبت تراکم متغیر شامل سه ایده اصلی است: کوچک‌سازی، سوپرشارژر، و متغیر نمودن نسبت تراکم. کوچک‌سازی، بهترین گزینه برای بهبود راندمان است. موتور VCR قادر است از چندین سوخت استفاده نماید و قابلیت همراهی سایر سامانه‌ها نظیر GDI (فن آوری پاشش مستقیم بنزین)^۲، VVT (زمان بندی متغیر سوپاپ‌ها)^۳ و سوپر شارژر را دارد [۱۰].

یک موتور نسبت تراکم متغیر (VCR) در حالت تمام بار نسبت تراکم را کاهش می‌دهد تا از وقوع پدیده کوپش جلوگیری کند و در حالت نیمه بار، با افزایش نسبت تراکم راندمان را افزایش می‌دهد.

شاید بعضی‌ها تصور کنند سامانه (زمان بندی متغیر سوپاپ‌ها) می‌تواند عملکرد VCR را داشته باشد. اما این تصور غلطی است، زیرا VVT فقط با کاهش یا افزایش شار ورودی به سیلندر روی نسبت تراکم تأثیر می‌گذارد و کاهش شار ورودی به منزله کاهش راندمان حجمی و کاهش توان است. VVT این قابلیت را ندارد که در حالتی که توان بالاست (بار زیاد)، برای جلوگیری از کوپش نسبت تراکم را کاهش دهد و در حالتی که توان پائین است (بار کم)، نسبت تراکم را افزایش دهد. سامانه VCR به لحاظ فراهم نمودن نسبت تراکم مورد نیاز در شرایط کاری مختلف منحصر به فرد است. بهترین انتخاب، ترکیب VVT و VCR می‌باشد. در حالت نیمه بار، برای داشتن بازده بالا VCR نسبت تراکم را افزایش می‌دهد و از طرفی VVT تلفات پمپی را کاهش می‌دهد [۹].

نسبت تراکم به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ . Variable Compression Ratio

^۲ . Gasolin Direct Injection

^۳ . Variable Valve Timing

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (1-1)$$

V_d حجم مفید سیلندر و V_c حجم محفظه احتراق می‌باشد. به عبارت دیگر، نسبت تراکم نشان دهنده اینست که مخلوط هوا و سوخت در داخل سیلندر قبل از جرقه شمع به چه نسبتی، حجمش کم شده است. در موتورهای احتراق داخلی، نسبت تراکم یکی از مهم ترین پارامترهایی است که نشان می‌دهد چه مقدار از انرژی حرارتی سوخت به کار تبدیل می‌شود. برای چرخه خودکار، راندمان حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \quad (2-1)$$

γ نسبت گرمایی ویژه و r_c نسبت تراکم می‌باشد. برای موتورهای SI که در آن مخلوط بنزین و هوا در شرایط استوکیومتریک است، $\gamma \sim 1/3$ می‌باشد. بر اساس رابطه فوق با افزایش نسبت تراکم، راندمان حرارتی افزایش می‌یابد. موتورهای معمولی، نسبت تراکمی در حدود ۹ به ۱ تا ۱۱ به ۱ دارند. حال یک سؤال اساسی مطرح می‌شود: چرا نسبت تراکم را بالا نمی‌برند تا متناسب آن راندمان هم افزایش یابد که برای این سوال دلایل در زیر آمده است [۱۲]:

- اگر نسبت تراکم از حد معینی بالاتر رود، دمای مخلوط هوا و سوخت به حد خوداشتعالی می‌رسد و پدیده کوبش رخ خواهد داد. کوبش، کاهش راندمان و صدمه دیدن قطعات مکانیکی موتور را به دنبال دارد.
- به دلیل افزایش فشار در مرحله تراکم و قدرت، اصطکاک بین پیستون و دیواره سیلندر و یاتاقان‌های میل لنگ افزایش می‌یابد.
- افزایش تلفات حرارتی از محفظه احتراق، به دلیل افزایش دمای ماکزیمم چرخه.

موتورهای معمولی طوری طراحی می‌گردند، که نسبت تراکم آنها در حالت تمام بار بهینه باشد. از آنجایی که این موتورها در شرایط مختلف کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالت نیمه بار به

علت پایین بودن نسبت تراکم راندمان پایینی دارند و مصرف سوخت آنها بهینه نخواهد بود. ایده موتور نسبت تراکم متغیر ساده است. استفاده از نسبت تراکم بالا در شرایط بار کم برای افزایش راندمان و استفاده از نسبت تراکم کم در حالت تمام بار برای جلوگیری از کوبش [۱۲].

۱-۶- بیان مسئله و روش تحقیق

در این پژوهش با تمرکز بر روی پیکربندی آلفا در موتور استرلینگ، به طراحی حالت نسبت تراکم متغیر آن پرداخته خواهد شد. در این میان، انتخاب بهترین مقادیر برای متغیرهای تصمیم مساله، آن را به یک مساله بهینه‌سازی تبدیل خواهد کرد. متغیرهای طراحی مساله با توجه به هندسه موتور و نحوه تغییر در ساختار آن مشخص خواهد شد. برای حل مساله بهینه‌سازی از روش‌های فراابتکاری پیشنهادی روش ازدحام ذرات و یا از الگوریتم‌های نوظهوری همچون شیرمورچه و ازدحام ذرات استفاده و نتایج آنها با هم مقایسه خواهند شد. لذا تفاوت‌ها و نوآوری‌های این تحقیق بصورت زیر می‌باشد:

✓ طراحی حالت نسبت تراکم متغیر برای پیکربندی نوع آلفا موتور استرلینگ.

✓ انتخاب متغیرهای طراحی و تابع هدف مناسب براین مساله.

برای انجام این تحقیق ضمن انجام مطالعات و تحقیقات در زمینه موتور استرلینگ، در ابتدا باید روابط سینماتیکی و ترمودینامیکی حاکم بر پیکربندی‌های مختلف استخراج و نمودار $P - V$ مربوط به موتور رسم شود. سپس با بررسی روش‌های مختلف برای تبدیل موتور تراکم ثابت به یک موتور با تراکم متغیر، متغیرهای طراحی و تابع هدف مساله استخراج شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، به تعیین ساختار بهینه مکانیزم موردنظر پرداخت. بدیهی است برای اعمال عملیات فوق به کدنویسی در نرم افزار MATLAB نیاز خواهد بود. عمده فعالیت‌های مدنظر در این تحقیق بصورت زیر می باشد:

✓ استخراج روابط سینماتیکی پیکربندی نوع آلفا موتور استرلینگ.

✓ کوپل کردن روابط سینماتیکی و معادلات ترمودینامیکی.

✓ بررسی روش های مختلف برای تبدیل موتور تراکم ثابت به یک موتور با تراکم متغیر.

✓ تعریف توابع هدف و متغیرهای طراحی مساله.

✓ بهینه سازی بر اساس روش های فراابتکاری.

✓ مقایسه نتایج با مراجع.

۷-۱- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

در دنیای در حال توسعه امروز و با رشد روز افزون تکنولوژی، اکثر کارها با دقت و سرعت بالاتر توسط ماشین ها انجام می گردد. با توجه به ماشینی شدن کارها و گسترش فناوری های جدید، استفاده از انرژی در حال افزایش است. امروزه اکثر انرژی مصرفی جهان از سوخت های فسیلی و غیرقابل تجدیدپذیر تهیه می گردد. این در حالی است که این سوخت ها 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 سوخت های فسیلی کند. در چنین شرایطی است که انرژی های نوین منبع اصلی انرژی جهان می شود. در راستای تحقق این امر، یکی از سیستم هایی که اخیرا مورد توجه قرار گرفته اند، موتورهای پاک و از جمله آنها موتورهای استرلینگ هستند

فصل ۲: مروری بر ادبیات پیشین

۲-۱- مقدمه

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 ویژه ای تحت عنوان بازیاب حرارت بود [۱۳-۱۴]. با گذشت بیش از دو قرن از اختراع اولین موتور استرلینگ هنوز مطالعات فروانی برای بهبود بخشیدن به آن انجام می‌گیرد و استفاده‌های فروانی 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 [۱۵]. تحلیل اشمیت امروزه نیز در تحلیل‌های اولیه موتورهای استرلینگ به کار می‌رود. اوریلی^۱ و برچوویتز^۲ مدل جدیدی را با استفاده از محاسبات عددی ارائه کردند [۱۶] که به مدل سیمپل شناخته می‌شود. این مدل یک مدل ادیاباتیک آرمانی است که می‌تواند تأثیرات زاویه فاز، نسبت حجم جاروب و نسبت حجم مرده را پیش بینی کند. پژوهش‌های زیادی در ارتباط با موتور استرلینگ و تحلیل‌های متنوع از جمله ترمودینامیکی، سینماتیکی و دینامیکی انجام شده است که در ادامه به مهمترین آنها اشاره شده است.

۲-۲- ادبیات پیشین

تحقیقاتی در ارتباط با توسعه روابط تجربی به منظور تخمین قدرت خروجی و همچنین راندمان موتور استرلینگ انجام شده است. وست^۳ در سال ۱۹۸۶ [۱۷] یک پارامتر بی بعد را به منظور پیش بینی قدرت موتور ارائه کرده است. عدد بیل به وسیله قدرت خروجی موتور، فشار متوسط، حجم

^۱ . Urieli

^۲ . Berchowitz

^۳ . West

جارو شده توسط پیستون و فرکانس موتور تعریف می‌شود. وست پیشنهاد کرد برای محدوده وسیعی از موتورهای استرلینگ می‌توان از عدد بیل برابر با ۰/۰۱۵ استفاده کرد. رابطه ارائه شده توسط بیل، در ارتباط با نتایج آزمایشگاهی پایه‌ای که بر مبنای آن تهیه شده بود دارای دقت مناسبی بود و در ارتباط با سایر موتورها دقت پیش بینی بالایی نداشت. بعدها وست، به منظور اعمال اثرات تغییرات دما در چرخه کاری موتور، ضریب تصحیح تجربی به نام F را پیشنهاد نمود که برای پیش بینی دقیقتر از توان خروجی موتور مورد استفاده قرار گیرد. بعدها سنفت^۱ در سال ۱۹۹۳ [۱۸]، تحقیقات گسترده‌ای در این حوزه انجام داد و به این نتیجه رسید که در موتورهای با نسبت دمای پایین به ضریب تصحیحی بزرگتر از آنچه پیشنهاد وست بود؛ نیاز می‌باشد.

کنگتراگول^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۹]، راندمان موتور استرلینگ با پیکربندی گاما را مورد بررسی قرار دادند و رابطه‌ای مناسب برای محاسبه توان خروجی موتور استرلینگ ارائه نمودند که این رابطه توان خروجی از موتور با پیکربندی گاما را با دقت مناسبی پیش بینی می‌نمود. همچنین در این تحقیق، محققان به این نتیجه رسیدند که رابطه بیل برای موتورهای استرلینگ با نسبت دمایی بالا، رابطه مناسبی نبوده و برای استفاده از این رابطه، حتما باید از ضریب تصحیح مناسبی استفاده شود.

پریئو^۳ و همکاران طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ [۲۰-۲۱]، محدوده وسیعی از نتایج آزمایشگاهی را مورد ارزیابی قرار دادند و از تشابه دینامیکی برای موتورهای مختلف استفاده کردند. همچنین پریئو و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۲۲] به منظور دقت بخشیدن به پیش بینی قدرت خروجی موتور، از تحلیل ابعادی به منظور بررسی اثرات نشت و اتلافات مکانیکی استفاده کردند. پریئو و همکاران در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۰۵ [۲۳]، یافتند که استفاده از روابط مربوط به آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن انتهای موجود در موتور، رابطه بسیار دقیق تری ارائه می‌دهد. با این وجود

^۱ . Senft

^۲ . Kongtragool

^۳ . Prieto

تمامی روابطی که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی شکل گرفته بودند، قابل تعمیم برای همه موتورها نبوده و در برخی از موتورها دارای جواب مناسب و در برخی دیگر جواب نامناسبی را پیش بینی می کردند.

پارلاک^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۲۴] مدل عددی جریان شبه پایا را توسعه داده و مدل جدید را بر روی یک موتور استرلینگ نوع گاما مورد ارزیابی قرار دادند. در این مدل با استفاده از مقادیر محاسبه افت فشار در محفظه ها، فشار در هر محفظه تعیین شده بود.

تلی^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۲۵]، مدل مرتبه دو آدیاباتیک جدیدی را بر مبنای رویکرد جریان شبه پایا در موتور استرلینگ ارائه کردند که در آن اثرات اتلاف های حرارتی و افت فشار در هریک از اجزا مورد توجه قرار گرفته بود. این مدل به عنوان مدل دینامیک نامیده شده و اثرات افت فشار در مبدل ها، اتلاف در بازیاب و سایر اثرات اتلاف در این مدل اعمال شده است.

اسکولز^۳ و اسچوندیگ^۴ در سال ۱۹۹۶ [۲۶]، مدلی ریاضی به منظور شبیه سازی موتور استرلینگ ارائه کردند. اسکولز و همکارانش برای مدل سازی جریان در مبدل های موجود در موتور، جریان سیال در مبدل ها را به صورت جریان نوسانی در نظر گرفته و اثرات افت فشار و انتقال حرارت موجود در مبدل ها را بر مبنای این اثرات جریان نوسانی در مدل خود اعمال نمودند. به منظور تهیه مدل عددی، معادلات دیفرانسیل معمولی برای حجم کنترل های موجود در موتور نوشته شده و از قانون گاز ایده آل نیز استفاده شده است. نتایج حاصله از مدل اسکولز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل مشاهده شد.

محکوف^۵ و همکارش در سال ۱۹۹۹ [۲۷]، محفظه های کاری را با در نظر گرفتن افت های مکانیکی برای یک موتور یک کیلووات خورشیدی از نوع آلفا، مورد تحلیل قرار دادند. در این مدل،

¹ . Parlak

² . Tlili

³ . Schulz

⁴ . Schwendig

⁵ . Makhkamov

اثر افتهای هیدرولیکی و انتقال حرارت در تمام محفظه ها به وسیله یک روش ریاضی مرتبه ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور محاسبه افت فشار، اثرات نیروهای اصطکاکی بین عایق و سیلندر، عایق بندی شفت، یاتاقان ها و مقاومت ایرودینامیکی در چرخ طیار مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. بررسی های انجام شده در تحقیقات محکومف نشان داد، افت های مکانیکی موجود در موتور تقریباً به میزان ۵۰ درصد توان اندیکه شده موتور استرلینگ می باشد.

کارابالوت^۱ در سال ۲۰۰۶ [۲۸]، مدل خود را با افزودن معادلات سینماتیکی به تحلیل موتور استرلینگ توسعه داد. کارابالوت برای توسعه مدل خود، دسته معادلات سینماتیک مربوط به حرکت پیستون قدرت و جابجاکننده را استخراج کرده و به مدل عددی اولیه خود کوپل نمود.

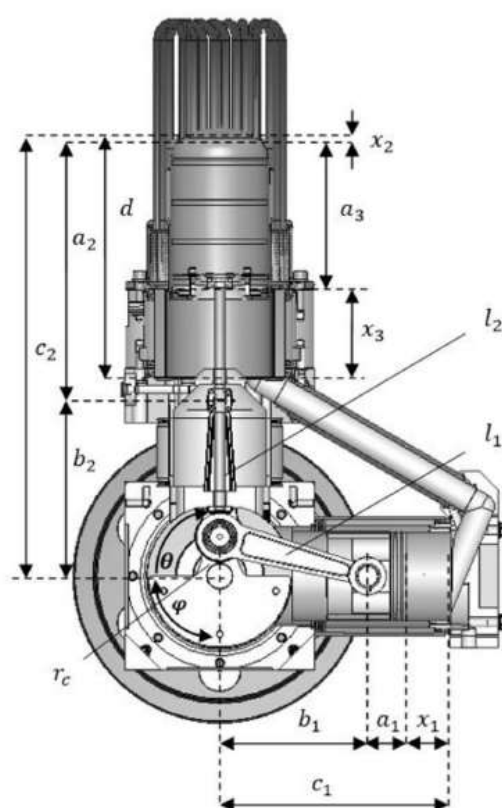
رابسون^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ [۲۹]، یک مدل برای موتور استرلینگ با نسبت دمایی پایین توسعه دادند که در این مدل، اثرات مشخصه های مربوط به سیال عامل در محفظه های انبساط، تراکم و بازیاب مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه این مدل، علاوه بر اینکه معادلات بقای جرم و انرژی در محفظه ها توسعه داده شد، معادلات سینماتیکی و حرکت مربوط به مکانیزم حرکت پیستون و جابجاکننده نیز مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است برای دستیابی به همگرایی در شبیه سازی جریان ناپایا در این تحقیق از گامهای زمانی بسیار کوچک استفاده شده بود.

هوشنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۳۰] به شبیه سازی پاسخ دینامیکی برای موتور استرلینگ از نوع گاما پرداختند. این مطالعه یک مدل دینامیکی از یک موتور استرلینگ نوع گاما را ارائه می دهد و تغییرات سرعت دورانی میل لنگ در برابر زمان را بررسی می کند (پاسخ دینامیکی). بدین ترتیب که روابط سینماتیک اتصالات موتور تعیین شده و فرمول بندی لاگرانژ برای دینامیک بدنه صلب شکل گرفته است. فشارهای گاز بر روی هر سطح از اجسام صلب در طول زمان با

¹ . Karabulut

² . Robson

استفاده از کد تحلیل ترمودینامیکی مرتبه سوم محاسبه شد. سپس یک آزمایش برای اندازه‌گیری متغیرهای حالت دینامیکی و ترمودینامیکی موتور ST500 ایجاد شد. ابتدا، داده‌های تجربی برای اعتبار سنجی نتایج کد ترمودینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. سپس فرمولاسیون‌های دینامیکی ترکیب‌شده با کد ترمودینامیکی به طور همزمان حل شده و نتایج با پاسخ دینامیکی ST500 مقایسه شده‌اند. در نهایت، با استفاده از کل مدل دینامیکی، جنبه‌های جدید رفتار موتور استرلینگ مورد بررسی قرار گرفت.

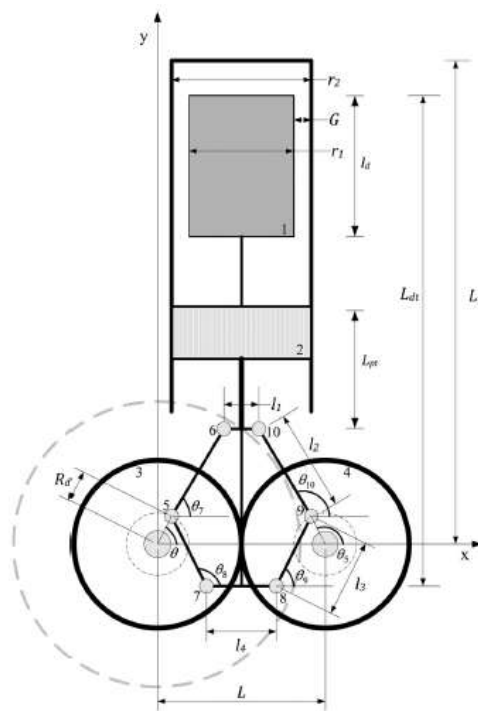


شکل ۱-۲. سینماتیک ST500 [۳۰].

چنگ^۱ و همکارش در سال ۲۰۱۲ [۳۱] به ترکیب مدل‌های دینامیکی و ترمودینامیکی برای شبیه‌سازی دینامیکی یک موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم محرک لوزی پرداختند. در این تحقیق شبیه‌سازی دینامیک موتور تحت شرایط عملیاتی و هندسی مختلف با اتصال مدل دینامیکی به

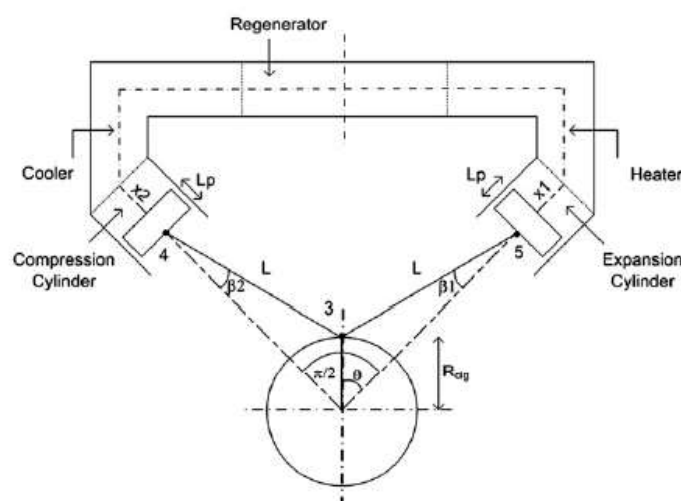
^۱. Cheng

مدل ترمودینامیکی موجود انجام شده است. در این ارتباط، نیروهای لحظه‌ای وارد بر پیستون در انبساط و تراکم با کمک مدل ترمودینامیکی تعیین می‌شوند. هنگامی که نیروهای گاز به دست می‌آیند، مدل دینامیکی برای تعیین موقعیت‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های اجزای موتور در گام زمانی متوالی استفاده می‌شود، و سپس فشارهای گاز در انبساط و تراکم با مدل ترمودینامیکی بدست آورده می‌شود. به این ترتیب، تغییرات گذرا در سرعت دورانی موتور در طول مکانیزم، شروع و منحنی‌های عملکرد موتور که نشان‌دهنده وابستگی خروجی توان و بازده حرارتی به سرعت دوران است بدست آمده‌اند. در این تحقیق، اثرات پارامترهای هندسی و عملیاتی اصلی بر سرعت چرخشی حالت پایدار، حداکثر توان خروجی و بازده حرارتی به طور کامل در یک مطالعه پارامتری جامع مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.



شکل ۲-۲. شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم رانندگی لوزی [۳۱].

اسکولو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۳۲] به شبیه سازی ترکیبی دینامیکی-ترمودینامیکی موتور استرلینگ دوسیلندر آلفا پرداختند. در این پژوهش مدل دینامیکی با یک مدل ترمودینامیکی که امکان تجزیه و تحلیل و مقایسه رفتار نظری و تجربی موتور و درک بهتر کل فرآیند را فراهم می‌کند، همراه شده است. از طرف دیگر، یک طراحی مجدد نمونه اولیه ارائه شده است. مدار حرارتی به منظور از بین بردن تلفات، کاهش حجم مرده و بهبود انتقال حرارت به سیال عامل بهبود یافته است. تغییرات سیستم آب‌بند و طراحی پیستون‌ها نیز در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در این مقاله رابطه‌ای برای تعیین اندازه چرخ لنگر توسعه داده شده است و در نهایت نتایج به دست آمده در تست‌های بین طرح جدید و قبلی مقایسه شده است.



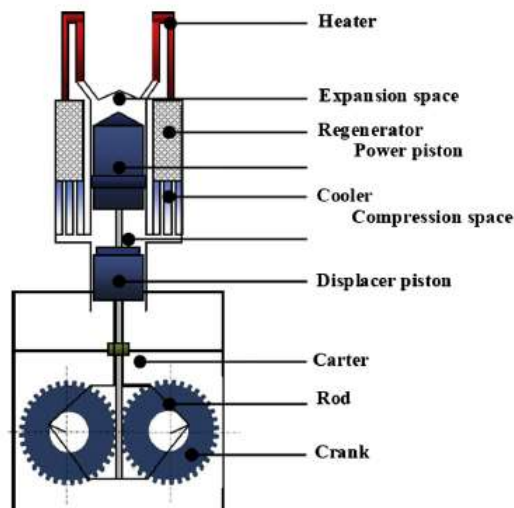
شکل ۲-۳. شماتیک موتور استرلینگ نوع آلفا [۳۲].

افضلی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۳۳] به تحلیل دینامیکی لنگ و لغزنده V شکل در موتور استرلینگ پرداختند. در این پژوهش یک مدل دینامیکی برای مکانیزم لنگ و لغزنده موتور ارائه، و سپس با یکی از مدل های ترمودینامیکی شناخته شده موتور استرلینگ ترکیب شده است تا امکان پیش بینی رفتار گذرای حین راه اندازی موتور فراهم شود. در مطالعه حاضر، موتور با یک سرعت

¹. Scollo

دورانی اولیه راه اندازی می‌شود؛ گشتاور وارده از سوی چرخ طیار موتور در هر لحظه زمانی به کمک مدل دینامیکی حساب شده و هم چنین، فشار سیال کاری، اینرسی جرمی، نیروهای اصطکاکی، و بار خارجی روی موتور محاسبه می‌گردند. سپس، سرعت دورانی لحظه ای موتور از طریق انتگرال گیری از معادله حرکت دورانی نسبت به زمان تعیین می‌شود و با مشخص شدن آن، مقدار لحظه ای فشار و سایر خواص ترمودینامیکی سیال کاری موتور قابل محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب، بررسی خواص متغیر سیال کاری موتور و رفتار دینامیکی مکانیزم موتور به صورت هم زمان و از طریق کوپل کردن مدل های دینامیکی و ترمودینامیکی صورت پذیرفته است. هم چنین در این پژوهش، مطالعه ای پیرامون اثر تغییر مشخصات عملکردی و پارامترهای هندسی موتور نظیر ممان اینرسی جرمی چرخ طیار، سرعت دورانی اولیه، فشار پر کردن اولیه موتور، دمای منبع گرم، گام و سطح مقطع پیستون، طول شاتون ها و نیز اثر میزان حجم مرده فضای کاری بر رفتار گذرای موتور انجام شده است. در این راستا، منحنی های عملکردی موتور که ارتباط توان خروجی و بازده حرارتی به سرعت دورانی را نشان می دهند، ترسیم شده اند.

طغیانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۳۴] به بهینه سازی چند هدفه موتور استرلینگ GPU با استفاده از تحلیل مرتبه سوم پرداختند. در این مطالعه، بهینه سازی چند هدفه با چهار متغیر شامل دمای منبع گرما، ضربه، فشار موثر متوسط و فرکانس موتور به منظور افزایش بازده و توان خروجی و کاهش افت فشار به کار گرفته شد. سه روش تصمیم گیری برای بهینه سازی پاسخ از نتایج به کار گرفته شد. در نهایت، روش های به کار رفته با نتایج به دست آمده از یک کار تجربی مقایسه شدند و توافق خوبی مشاهده شد.



شکل ۲-۴. موتور استرلینگ نوع بتا [۳۴].

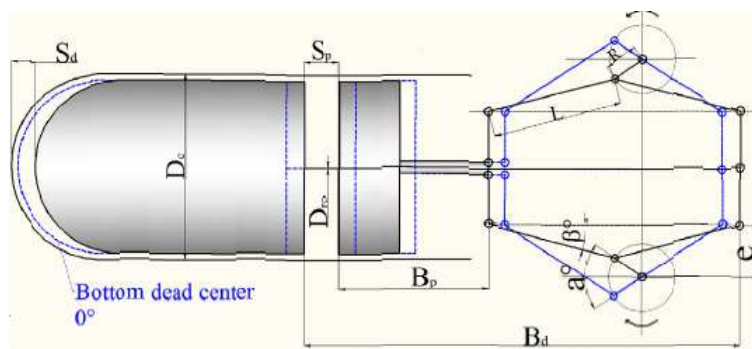
دوان^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۳۵] به بهینه سازی سیستم موتور استرلینگ با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات پرداختند. در مطالعه حاضر، یک مدل ریاضی مبتنی بر آنالیز ترمودینامیکی _دینامیکی موتور استرلینگ با توجه به تلفات داخلی توسعه یافته است. خروجی توان، بازدهی حرارتی و پارامترهای برگشتناپذیری چرخه موتور استرلینگ با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه سازی شده اند که از الگوریتم ژنتیک بسیار موثرتر است. در این مساله بهینه سازی، برخی از پارامترهای مهم موتور استرلینگ به عنوان متغیرهای تصمیم گیری در نظر گرفته می شوند، مانند دمای سیال کاری در فرآیند ایزوترمال و دمای پایین، نسبت حجم تلفات، حجم هر کدام از فضاهای کاری و فشار بار سیستم. نتایج نشان می دهد که رویکرد بهینه سازی چند هدفه پیشنهادی می تواند به طور قابل توجهی بهتر از رویکردهای تک هدف سنتی عمل کند.

ژیائو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۳۶] یک روش ترکیبی برای انجام شبیه سازی چند هدفه یک موتور استرلینگ با استفاده از اطلاعات دقیق فشار و حجم توسط آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی

¹ . Duan

² . Xiao

ارائه داده اند. آن ها برای به حداکثر رساندن راندمان حرارتی و توان خروجی و همچنین به حداقل رساندن توان اتلافی در موتور استرلینگ، پارامترهای قطر و طول لوله های گرم کن و سردکن، طول بازیاب حرارت، مش ماتریس و قطر سیم را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفتند.



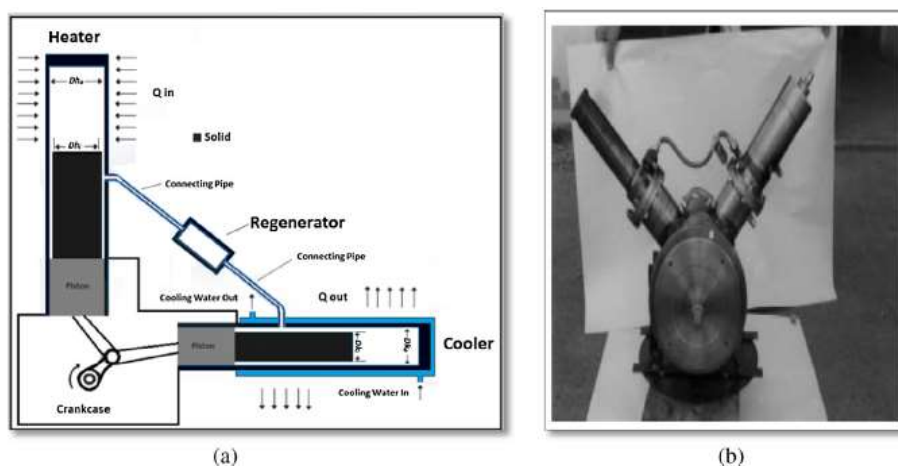
شکل ۲-۵. شماتیک مکانیزم ژائو و همکاران [۳۶].

احمدی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۳۷] به بهینه سازی چند منظوره برای طراحی موتور حرارتی استرلینگ با توان بیشینه، بازده حرارتی بیشینه و افت فشار کمینه پرداختند. در مطالعه حاضر، توان خروجی و بازده حرارتی موتور بهینه شده است و تلفات فشار کل با استفاده از الگوریتم NSGA و تحلیل ترمودینامیکی سرعت محدود کمینه شده است. نتایج این پژوهش با موفقیت در برابر داده های تجربی تایید شده اند.

آلماجری^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۳۸] به مدل سازی و مطالعه پارامتری عملکرد موثر یک موتور استرلینگ نوع آلفا براساس تحلیل CFD سه بعدی پرداختند. این مقاله، یک روش جدید ترکیب مدل ترمودینامیکی با تحلیل ۳ بعدی CFD را برای بررسی عملکرد یک موتور استرلینگ نوع V آلفا تحت شرایط عملیاتی و پارامترهای طراحی مختلف پیشنهاد کرده است. مدل ترمودینامیکی یک موتور استرلینگ نوع آلفا با استفاده از تحلیل ایده آل آدیاباتیک توسعه داده شده و در برابر اندازه گیری های تجربی نمونه اولیه موتور اعتبارسنجی شده است. سپس یک مدل CFD سه بعدی توسعه داده شد و نتایج، در مقایسه با نتایج مدل ترمودینامیکی، توافق خوبی در پیش بینی

¹. Almajri

توان نشان داده شده نشان دادند. مدل CFD برای انجام یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف طراحی و شرایط عملیاتی مانند فشار بار، قطر سیم ماتریس، حجم مرده و دماهای انتهای گرم / سرد بر روی عملکرد موتور از نظر توان خروجی، از طریق پیش‌بینی نمودار PV موتور استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌سازی CFD، بهبود پارامترهای طراحی و شرایط عملیاتی را برای موتورهای استرلینگ نوع آلفا به همراه خواهد داشت.



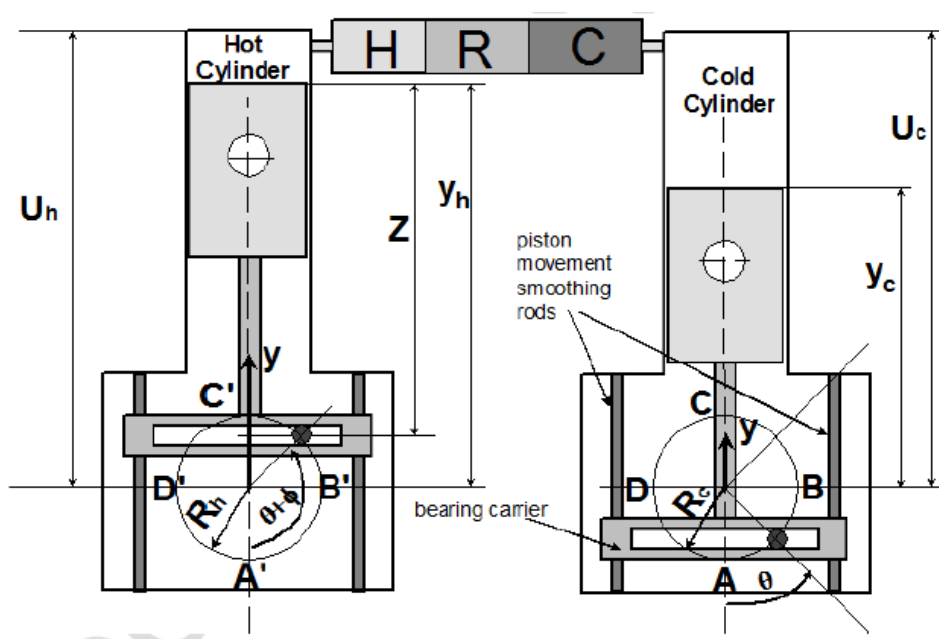
شکل ۲-۶. (a) نمودار شماتیک، (b) نمونه اصلی [۳۸].

آلتین^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [۳۹] به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و دینامیکی یک موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم یوک اسکاچ^۲ پرداختند. در این مطالعه مفهوم موتور استرلینگ نوع آلفا براساس مکانیزم اسکاچ یوک با سیلندرهای موازی پیشنهاد شده است. یک میل‌لنگ غیر متعارف حامل بال‌ها در هر دو انتها در نظر گرفته شده که بر روی فلنج قرار گرفته‌اند. پیستون‌ها با استفاده از یاطاقان‌های شکاف به میل‌لنگ متصل شدند. در این موتورها نیروی رانش بین پیستون‌ها و سیلندرهای آن‌ها به اندازه کافی کم است. اجزای متحرک موتور هیچ حرکت جانبی انجام نمی‌دهند و بنابراین هیچ ارتعاش جانبی وجود ندارد. با این حال، به دلیل انبوه پیستون‌ها و قطعات

^۱ . Altin

^۲ . Scotch Yoke Mechanism

نصب شده، سرعت میل لنگ نوسانات را نشان خواهد داد. در این تحقیق با تهیه یک برنامه شبیه سازی ترمودینامیکی - دینامیکی، برخی از جنبه های ترمودینامیکی و دینامیکی موتور مورد بررسی قرار گرفته است. خروجی توان موتور با توجه به نسبت مساحت پیستون ها، نسبت شعاع لنگ پیستون ها و زاویه فاز بین پیستون ها بهینه شده است. در نتیجه این بهینه سازی ها به ترتیب ۵/۶٪، ۱٪ و ۲/۴٪ افزایش در توان موتور حاصل شد. همچنین نوسانات سرعت میل لنگ تا ۱۰٪ سرعت متوسط به حداقل رسید.

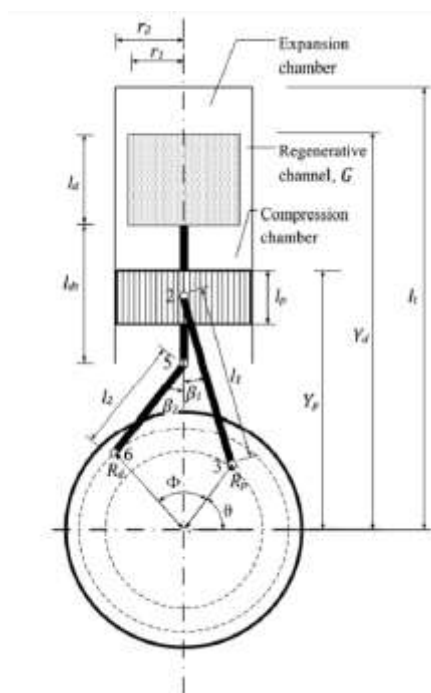


شکل ۲-۷. نمای شماتیک مکانیسم [۳۹].

چنگ^۱ و همکارش در سال ۲۰۱۱ [۴۰] به شبیه سازی دینامیکی یک موتور استرلینگ با مکانیزم drive - cam از طریق ترکیب مدل های ترمودینامیکی و دینامیکی پرداختند. بدین صورت که یک مدل دینامیک از مکانیزم توسعه داده می شود و سپس با مدل ترمودینامیک ترکیب می شود تا رفتار گذرا موتور در دوره شروع پیش بینی شود. در این مطالعه موتور از سرعت دورانی اولیه شروع می شود. گشتاور اعمال شده توسط چرخ موتور در هر لحظه می تواند توسط مدل دینامیکی، تا زمانی

¹. Cheng

که فشار گاز در محفظه، اینرسی، نیروی اصطکاک و بار خارجی مورد ارزیابی قرار گیرد، محاسبه شود. سرعت چرخش لحظه‌ای موتور با انتگرال گیری معادله حرکت چرخشی با توجه به زمان تعیین می‌شود که تغییرات آنی فشار و دیگر خواص ترمودینامیکی گاز درون محفظه را تحت‌تاثیر قرار دهد. بنابراین، تغییرات گذرا در خواص گاز درون محفظه موتور و رفتار دینامیکی مکانیزم موتور باید به طور همزمان از طریق جفت شدن مدل‌های ترمودینامیک و دینامیک جابجا شود. مطالعه پارامتری گسترده‌ای از اثرات پارامترهای عملیاتی و هندسی مختلف انجام شده‌است و نتایج مربوط به اثرات گشتاور جرم چرخ، سرعت دورانی اولیه، دمای منبع حرارت، زاویه فاز، اندازه شکاف، طول جابجایی، و فشار پیستون بر رفتار گذرا موتور مورد بررسی قرار گرفته است.



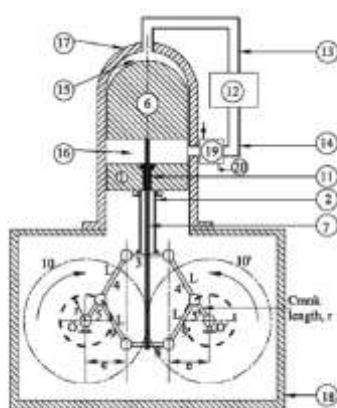
شکل ۲-۸. نمودار شماتیک موتور استرلینگ نوع بتا با مکانیزم محرک بادامک [۴۰].

دینگ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [۴۱] به بهینه‌سازی نسبت حجم موتور استرلینگ با استفاده از یک مدل ارتقا یافته پرداختند. یک مدل ارتقا یافته براساس مدل آدیاباتیک ایده‌آل در

^۱. Ding

این مقاله ارایه شده است که در آن اتلاف حرارت براساس فرضیات جدید و مکانیسم‌های مختلف از جمله از دست دادن گرما و فشار در مبدل‌های حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، بازده حرارتی به عنوان توابعی از نسبت حجم در شرایط مختلف ارایه شده است، از جمله آنها می‌توان به اختلاف دمایی مختلف و اختلاف فاز اشاره کرد. نتایج آنها نشان داد که رابطه تابع بین بازده حرارتی و نسبت حجم یکنواخت نیست و یک مقدار بیشینه وجود دارد. علاوه بر این، نتایج براساس الگوریتم ژنتیک و مقادیر بهینه نسبت حجمی متناظر با ماکزیمم راندمان حرارتی در دماهای مختلف و دماهای پایین‌تر در این پژوهش آورده شده است.

شیندج^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۴۲] تحلیلی از دینامیک موتور استرلینگ نوع بتا به همراه مکانیزم حرکتی لوزی ارائه کرده است. به منظور تحلیل و طراحی مکانیکی مکانیزم لوزی در مرحله اول با استفاده از مشخصات هندسی مکانیزم حرکتی لوزی استفاده شده. معادلات جابه جایی پیستون و جابه جاشونده و زوایای اتصالات مکانیزم حرکتی بر حسب زوایای مختلف میل لنگ به دست می‌آید. در مرحله بعد گشتاور روی محور خروجی ناشی از فشار سیال کاری موتور و نیروهای اینرسی محاسبه می‌شود. محاسبه گشتاور بر اساس تعادل انرژی موتور انجام می‌شود؛ گشتاور روی محور خروجی، مجموع گشتاور ناشی از فشار سیال کاری، نیروهای اینرسی و اصطکاک می‌باشد.



شکل ۲-۹. شماتیک موتور استرلینگ با مکانیزم لوزی [۴۲].

¹ . Shendage

غلامی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۴۳] به آنالیز دینامیکی موتور استرلینگ دوسیلندر خورجینی خورشیدی نوع آلفا پرداختند. در مقاله حاضر به شناسایی و آنالیز دینامیکی موتور استرلینگ نوع آلفا و به منظور تعیین معادلات دینامیکی حاکم بر این موتور، به عنوان مقدمه ای بر ساخت و مطالعات ارتعاشی آن، می‌پردازد. در این پژوهش پس از شناسایی ساختار دینامیکی موتور استرلینگ مورد نظر کلیه نیروهای وارد بر موتور که به سه دسته کلی نیروهای اینرسی، نیروهای ناشی از عکس العمل تکیه گاهها و نیروهای بالانسینگ تقسیم می شوند مورد بررسی قرار گرفته و گشتاورهای ناشی از این نیروها حول دستگاه مختصات مرجع محاسبه می‌گردند. تا در نهایت معادلات دینامیکی حاکم بر موتور بدست آیند. سپس با استفاده از معادلات حاصل می توان به طراحی اجزاء موتور، بررسی ارتعاشات موتور، انتخاب مناسب اجرام بالانسینگ به منظور کمینه سازی ارتعاشات موتور، کمینه سازی نیروهای متقل شده به پایه و اهداف دیگری که نیازمند معادلات دینامیکی حاکم بر موتور می‌باشد، پرداخت.

رحمتی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۴۴] به بهینه‌سازی سینماتیکی موتور استرلینگ مدل آلفا پرداختند. در این مطالعه، در ابتدا به تحلیل ابعادی موتور استرلینگ با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مدرن پرداخته می‌شود. در بهینه‌سازی سینماتیکی موتور، ابعاد هندسی مکانیزم مورد استفاده، جزو متغیرهای طراحی می‌باشند. بهینه‌سازی سینماتیکی بر روی چهار نوع مختلف از موتور استرلینگ اعمال شده است. سپس با استخراج روابط دینامیکی موتور استرلینگ نوع آلفا و ترکیب آن با معادلات ترمودینامیکی، به تحلیل و سپس بهینه‌سازی دینامیکی این نوع از موتور استرلینگ پرداخته شده است. در بهینه‌سازی دینامیکی جرم و ممان اینرسی اجزای موتور جزو مهم‌ترین متغیرهای طراحی بوده و تابع هدف، کاهش نوسانات سرعت خروجی پایای موتور می‌باشد. برای هر دو مساله بهینه‌سازی سینماتیکی و دینامیکی، از سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی سینماتیکی

نشان می‌دهد کار خروجی موتور با ابعاد بهینه، بین ۹,۱۴ تا ۱۴,۳۶ برابر شده است. همچنین براساس بهینه‌سازی دینامیکی، نوسانات سرعت پایای موتور بهینه بین ۱۹,۲۰ درصد تا ۹۰,۴۱ درصد کاهش یافته است.

۲-۳- نوآوری پژوهش

در این پژوهش با تمرکز بر روی پیکربندی آلفا در موتور استرلینگ، به طراحی حالت نسبت تراکم متغیر آن پرداخته خواهد شد. در این میان، انتخاب بهترین مقادیر برای متغیرهای تصمیم مساله، آن را به یک مساله بهینه سازی تبدیل خواهد کرد. متغیرهای طراحی مساله با توجه به هندسه موتور و نحوه تغییر در ساختار آن مشخص خواهد شد. برای حل مساله بهینه سازی از روش های فراابتکاری پیشنهادی الگوریتم روش ازدحام ذرات و از الگوریتم نوظهور شیرمورچه استفاده و نتایج آن ها با هم مقایسه خواهند شد. لذا تفاوت ها و نوآوری های این تحقیق بصورت زیر می باشد

- طراحی حالت نسبت تراکم متغیر برای پیکربندی نوع آلفا موتور استرلینگ.
- انتخاب متغیرهای طراحی و تابع هدف مناسب براین این مساله.
- استفاده از الگوریتم های فراابتکاری نوظهور در این مساله.

فصل ۳: معادلات حاکم

۳-۱- مقدمه

از مسائل اساسی که طراحان در طراحی موتور استرلینگ با آن روبرو هستند وقت گیر بودن فرآیند طراحی و ضرورت دقت در ساخت و هزینه‌های مربوط به آن می‌باشد. در بسیاری از موارد تخمین پارامترهای هندسی موتورها با استفاده از تجربه طراحان یا آزمایشات پرهزینه انجام می‌گیرد. بنابراین توسعه موتورها به نسبت پرهزینه، وقت‌گیر و مستلزم آزمون و خطاهای بسیار می‌باشد. با توجه به این موارد مدل کردن موتور می‌تواند به عنوان راه جایگزین مناسبی باشد. همچنین پیش‌بینی درست کار خروجی موتور از اهمیت بالایی برخوردار است که در مدل سازی‌های موجود [۱-۱۰] کار نامی به جای کار خروجی بهینه‌سازی شده است. با توجه به موارد ذکر شده تحقیق حاضر به منظور بهینه‌سازی پارامترهای هندسی موتور استرلینگ انجام شده است و ارزیابی عملکرد موتور با به کارگیری ترکیب بهینه‌ای از اختلاف فاز و نسبت حجم جاروب شده صورت گرفته که نتیجه آن کار خروجی بیشینه موتور می‌باشد.

۳-۲- معرفی تئوری اشمیت

تئوری اشمیت یک روش محاسباتی هم دما برای موتورهای استرلینگ می‌باشد. این تئوری یک روش ساده و بسیار سودمند برای تحلیل عملکرد این موتورهاست. این تئوری بر اساس انبساط و تراکم گاز ایده‌آل شکل گرفته است.

۳-۲-۱- فرضیات تئوری اشمیت

عملکرد موتور با محاسبه نمودار $P-V$ قابل بررسی است. حجم گاز عامل در موتور به راحتی با توجه به حجم داخلی موتور قابل محاسبه است. وقتی حجم، جرم گاز عامل و دمای گاز عامل مشخص باشد، فشار با توجه به روابط گاز ایده‌آل به صورت معادله زیر قابل محاسبه است [۴۵]:

$$PV = mRT \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه P ، فشار، V حجم، m جرم، R ثابت جهانی گازها و T دما می باشد. برای محاسبه فشار با استفاده از تئوری اشمیت شرایط زیر فرض می شود [۴۵]:

- در مبدل ها هیچ افت فشاری در نظر گرفته نمی شود بنابراین اختلاف فشار در فضای داخلی موتور وجود ندارد.
- فرآیندهای تراکم و انبساط به صورت ایزوترمال (هم دما) انجام می شوند.
- گاز عامل به صورت گاز ایده آل فرض می شود.
- راندمان بازیاب صددرصد در نظر گرفته می شود.
- در طول عملکرد سیکل، دمای محفظه انبساط برابر T و دمای محفظه تراکم برابر T ثابت می مانند.
- دمای محفظه بازیاب برابر با میانگین دمای محفظه تراکم و انبساط می باشد.
- تغییرات حجم گاز در سیلندرهای تراکم و انبساط (V_c و V_e) بصورت سینوسی می باشد.

۳-۲-۲- تئوری اشمیت برای موتور استرلینگ نوع آلفا

حجم های انبساط و تراکم در یک زاویه لنگ خاص ابتدا محاسبه می گردد. حجم های لحظه ای با توجه به زاویه لنگ (β) مشخص می شوند. این زاویه لنگ هنگامی که پیستون انبساط در نقطه مرگ بالاست برابر صفر در نظر گرفته می شود. حجم لحظه ای در محفظه انبساط (V_e) با توجه به رابطه (۳-۲) محاسبه می گردد [۴۵]:

$$V_e = \frac{V_{es}}{2}(1 - \cos\beta) + V_{emin} \quad (۲-۳)$$

که در رابطه بالا V_{es} حجم جاروب شده سیلندر انبساط، V_{emin} حجم مرده سیلندر انبساط و β زاویه لنگ می‌باشد. حجم لحظه‌ای در محفظه تراکم (V_c) با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۴۵]:

$$V_c = \frac{V_{cs}}{2} (1 - \cos(\beta - \alpha)) + V_{cmin} \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا V_{cs} حجم جاروب شده سیلندر تراکم، V_{cmin} حجم مرده سیلندر تراکم و α اختلاف فاز پیستون تراکم و انبساط می‌باشد. حجم لحظه‌ای کل نیز با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = V_e + V_r + V_c \quad (4-3)$$

با توجه به معادلات (۱-۳)، (۲-۳) و (۳-۳) تئوری اشمیت، جرم کل گاز عامل موجود در موتور (m) به وسیله رابطه (۵-۳) قابل محاسبه است:

$$m = \frac{PV_e}{RT_e} + \frac{PV_r}{RT_r} + \frac{PV_c}{RT_c} \quad (5-3)$$

نسبت دما، نسبت حجم‌های جاروب شده و نسبت حجم‌های مرده با توجه به روابط زیر تعریف می‌شوند [۴۵]:

$$\tau = \frac{T_c}{T_e} \quad (6-3)$$

$$k = \frac{V_{cs}}{V_{es}} \quad (7-3)$$

$$X_{ed} = \frac{V_{emin}}{V_{es}} \quad (8-3)$$

$$X_{cd} = \frac{V_{cmin}}{V_{es}} \quad (9-3)$$

$$X_r = \frac{V_r}{V_{es}} \quad (۱۰-۳)$$

دمای بازیاب با توجه به فرض شماره ۶ تئوری اشمیت با رابطه (۱۱-۳) محاسبه می‌گردد [۴۵]:

$$T_r = \frac{T_e + T_c}{2} \quad (۱۱-۳)$$

رابطه (۵-۳) با توجه به روابط (۶-۳) و (۱۱-۳) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$m = \frac{P}{RT_c} (\tau V_e + \frac{2V_r}{1 + \tau} + V_c) \quad (۱۲-۳)$$

رابطه (۱۲-۳) با استفاده از روابط (۲-۳) و (۳-۳) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$m = \frac{PV_{es}}{2RT_c} (S - B \cos(\beta - a)) \quad (۱۳-۳)$$

پارامترهای S و B با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه‌اند [۴۵]:

$$a = \tan^{-1} \frac{k \sin \alpha}{\tau + \cos \alpha} \quad (۱۴-۳)$$

$$S = \tau + 2\tau X_{ed} + \frac{4\tau X_r}{1 + \tau} + k + 2X_{ed} \quad (۱۵-۳)$$

$$B = \sqrt{\tau^2 + 2\tau k \cos \alpha + k^2} \quad (۱۶-۳)$$

فشار موتور با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۴۵]:

$$P = \frac{2mRT_c}{V_{es}(S - B\cos(\beta - a))} \quad (۱۷-۳)$$

فشار میانگین موتور نیز بصورت زیر می باشد:

$$P_{mean} = \frac{1}{2\pi} \oint P d\beta \quad (۱۸-۳)$$

$$= \frac{2mRT_c}{V_{es}\sqrt{S^2 - B^2}}$$

پارامتر C بصورت زیر تعریف می شود [۴۵]:

$$C = \frac{B}{S} \quad (۱۹-۳)$$

برای محاسبه فشار موتور بر اساس فشار میانگین موتور از رابطه (۲۰-۳) استفاده می شود [۴۵]:

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{S^2 - B^2}}{(S - B\cos(\beta - a))} = \frac{P_{mean}\sqrt{1 - C^2}}{1 - C\cos(\beta - a)} \quad (۲۰-۳)$$

از طرفی دیگر با توجه به رابطه (۱۷-۳) زمانی که $\cos(\beta - a) = -1$ فشار موتور به مقدار

مینیمم خود می رسد که طبق رابطه زیر فشار مینیمم موتور برابر است با [۴۵]:

$$P_{mean} = \frac{2mRT_c}{V_{es}(S + B)} \quad (۲۱-۳)$$

بنابراین برای محاسبه فشار موتور، برحسب فشار مینیمم رابطه زیر قابل استفاده است [۴۵]:

$$P = \frac{P_{min}(S + B)}{(S - B\cos(\beta - a))} = \frac{P_{min}(1 + C)}{1 - C\cos(\beta - a)} \quad (۲۲-۳)$$

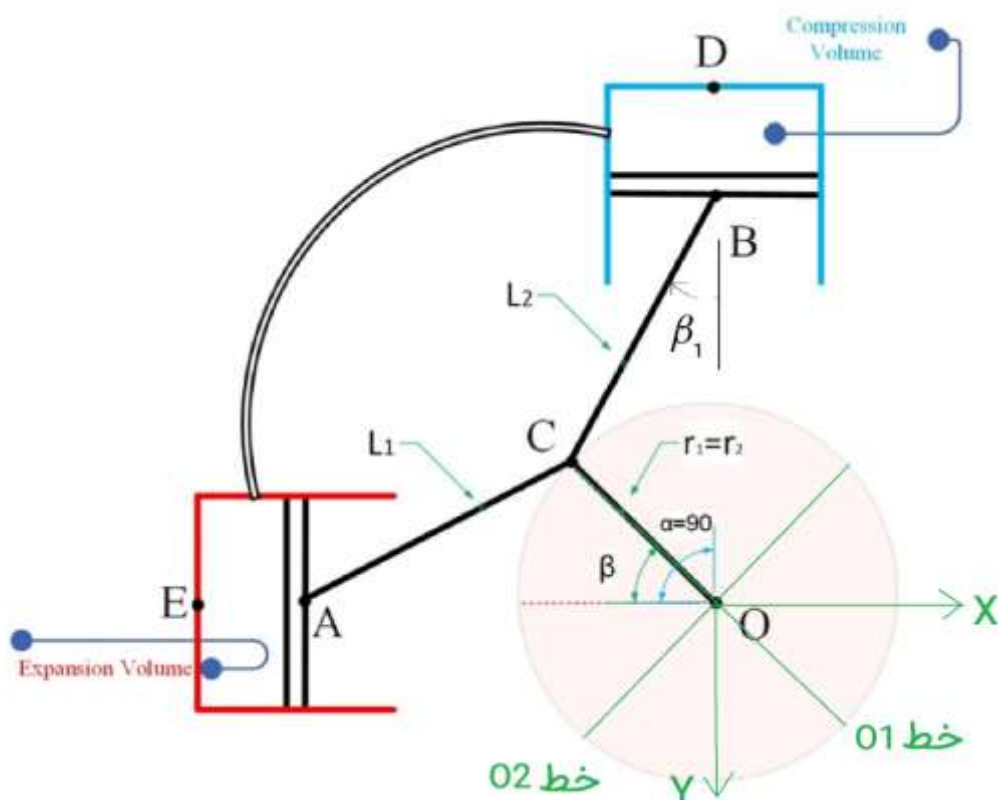
همچنین وقتی در رابطه (۳-۱۷) وقتی $\cos(\beta - \alpha) = 1$ باشد فشار موتور به ماکزیمم می‌رسد و برای محاسبه فشار موتور برحسب فشار ماکزیمم از رابطه زیر استفاده خواهد شد [۴۵]:

$$P = \frac{P_{max}(S - B)}{(S - B\cos(\beta - \alpha))} = \frac{P_{max}(1 - C)}{1 - C\cos(\beta - \alpha)} \quad (۳-۲۳)$$

۳-۳- معادلات سینماتیکی موتور استرلینگ نوع آلفا براساس

تغییر مکان نقطه O

در ادامه به تحلیل سینماتیکی موتور استرلینگ نوع آلفا براساس تغییر مکان نقطه O پرداخته می‌شود. در واقع برای ایجاد حالت نسبت متغیر در موتور، در مکانیزم لنگ و لغزنده موتور استرلینگ نوع آلفا که در شکل ۳-۱ نشان داده شده باید لولای O را جابه جا نمود.



شکل ۳-۱. نمایش شماتیک از موتور استرلینگ نوع آلفا با مکانیزم لنگ و لغزنده [۴۴].

با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل بالا می‌توان جابجایی پیستون‌های $AE(\beta)$ و $BD(\beta)$ را به شکل زیر محاسبه کرد. در همه این معادلات فرض می‌شود لولا بتواند تغییر مکانی به اندازه (x, y) بدهد. برای جابجایی پیستون $AE(\beta)$ از شکل ۱-۳ معادلات زیر استخراج می‌شود:

$$AE(\beta) = OE - OA \quad (۲۴-۳)$$

$$OE = (r_1 + l_1 + x) \quad (۲۵-۳)$$

$$OA = r_1 \cos(\beta) + \sqrt{L_1^2 - (r_1^2 \sin^2(\beta) - y^2)} \quad (۲۶-۳)$$

در روابط بالا r_1 ، l_1 و x به ترتیب شعاع لنگ، طول میله لغزنده، جابجایی در راستای افق را نشان می‌دهند. در نتیجه رابطه (۲۴-۳) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$AE(\beta) = (r_1 + l_1 + x) - (r_1 \cos(\beta) + \sqrt{L_1^2 - (r_1^2 \sin^2(\beta) - y^2)}) \quad (۲۷-۳)$$

برای پیستون $BD(\beta)$ معادلات به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$BD(\beta) = OD - OB \quad (۲۸-۳)$$

$$OD = r_2 + l_2 + y \quad (۲۹-۳)$$

$$OB = l_2 \cos(\beta_1) + r_2 \sin(\beta) \quad (۳۰-۳)$$

برای زاویه پیستون با محور عمودی (β_1) معادله زیر به دست می‌آید:

$$l_2 \sin(\beta_1) = r_2 \cos(\beta) - x \quad (۳۱-۳)$$

$$\sin(\beta_1) = \frac{r_2 \cos(\beta) - x}{l_2} \quad (۳۲-۳)$$

$$\beta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{r_2 \cos(\beta) - x}{l_2} \right) \quad (33-3)$$

در نتیجه رابطه (۳-۲۸) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$BD(\beta) = (r_2 + l_2 + y) - (l_2 \cos(\sin^{-1} \left(\frac{r_2 \cos(\beta) - x}{l_2} \right) + r_2 \sin(\beta))) \quad (34-3)$$

در روابط بالا r_2 ، l_2 و y به ترتیب شعاع لنگ، طول میله لغزنده، جابجایی در راستای عمود را نشان می‌دهند. برای حجم انقباض $V_e(\beta)$ و حجم انبساط معادلات به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$V_e(\beta) = \pi \cdot E_r^2 \cdot AE(\beta) \quad (35-3)$$

$$V_e(\beta) = \pi \cdot E_r^2 \cdot [(r_1 + l_1 + x) - \left(r_1 \cos(\beta) + \sqrt{L_1^2 - r_1^2 \sin^2(\beta)} \right)] \quad (36-3)$$

$$V_c(\beta) = \pi \cdot C_r^2 \cdot BD(\beta) \quad (37-3)$$

$$V_c(\beta) = \pi \cdot C_r^2 \cdot [(r_2 + l_2 + y) - (l_2 \cos(\sin^{-1} \left(\frac{r_2 \cos(\beta) - x}{l_2} \right) + r_2 \sin(\beta))] \quad (38-3)$$

در نتیجه حجم کامل $V_t(\beta)$ از حجم انبساط و حجم انقباض با توجه به معادله زیر به دست می‌آید:

$$V_t(\beta) = V_e(\beta) + V_c(\beta) \quad (39-3)$$

حداقل و حداکثر حجم موتور را می‌توان با استفاده از مشتق حاصل از ریشه‌های معادله زیر به دست آورد.

$$\frac{d(V_t(\beta))}{d(\beta)} = 0 \quad (40-3)$$

معادله بالا دارای دو ریشه β_1 و β_2 است که نتیجه عددی براساس تغییر در متغیرهای X و Y متفاوت خواهد بود و با استفاده از این ریشه‌ها می‌توان حداقل و حداکثر حجم را به دست آورد. اگر مقادیر X و Y برابر با صفر در نظر گرفته شوند دو ریشه معادله فوق برابر ۲۴۵ و ۴۲۰ درجه خواهد بود.

حال با توجه به معادلات فشار و بدست آمده در مراحل قبل و با استفاده از روابطی که در بالا توضیح داده شد نمودار $P-V$ برای موتور قابل رسم است. کار خروجی موتور نیز (سطح زیر نمودار $P-V$) در طی مراحل تراکم و انبساط با توجه به روابطی که قبلاً تعریف شده قابل محاسبه است. کار در محفظه انبساط بر حسب P_{mean} طبق روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

$$W_e = \oint P dV_e = \frac{P_{mean} V_{es} \pi C s \sin \alpha}{1 + \sqrt{1 + C^2}} \quad (41-3)$$

کار طی مرحله تراکم طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$W_c = \oint P dV_c = - \frac{P_{mean} V_{es} \pi C \tau s \sin \alpha}{1 + \sqrt{1 + C^2}} \quad (42-3)$$

کار خروجی موتور در طی یک سیکل، برای موتور استرلینگ نیز با توجه به رابطه (۴۳-۳) قابل محاسبه است:

$$W_i = W_e + W_c = \frac{P_{mean} V_{es} \pi C (1 - \tau) s \sin \alpha}{1 + \sqrt{1 + C^2}} \quad (43-3)$$

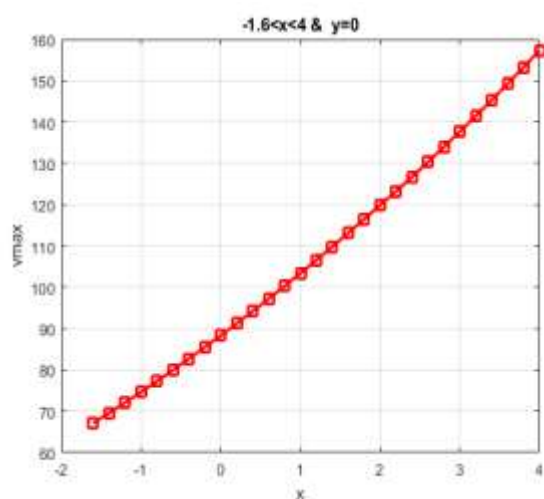
۳-۴- بررسی عملکرد موتور براساس تغییر مکان لولای O

۳-۴-۱- تغییر مکان لولای O در راستای محور x

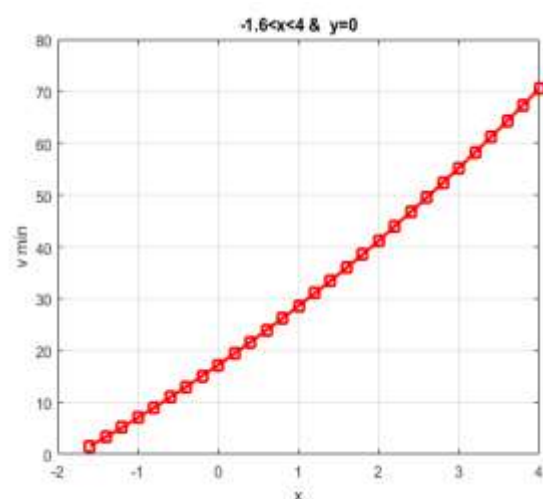
در این حالت، و براساس تغییر مکان لولا در راستای افقی، مقدار پارامتر y در معادلات برابر صفر منظور خواهد شد. در ادامه و با تغییر مقدار x ، می‌توان عملکرد موتور را مورد بررسی قرار داد. در جدول ۳-۱ مقادیر عددی تاثیر پارامتر x بر V_{min} ، V_{max} ، P_{min} ، P_{max} و W را نشان می‌دهد. درواقع براساس این مقادیر می‌توان دریافت تغییر مکان لولای موردنظر در راستای افقی چه تاثیری بر عملکرد موتور دارد. همچنین در شکل های ۳-۲ تا ۳-۶ اثر پارامتر x بر پنج مقدار ذکر شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش x مقدار کار خروجی کاهش پیدا می‌کند. علت این امر کاهش اختلاف فشار مینیمم و ماکزیمم است که نتیجه آن کاهش سطح زیر نمودار $P-V$ می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر منفی جدول و شکل ۳-۴ و ۳-۵ نتیجه می‌شود که برای برقراری قید طراحی یعنی مقادیر فشار ماکزیمم و مینیمم باید $4 < x < 1/6$ در نظر گرفته شود. قابل ذکر است که در تمامی جداول و نتایج این پایان نامه واحد فشار کیلوپاسکال، واحد x و y سانتیمتر، واحد حجم سانتیمتر مکعب و واحد کار ژول می‌باشد.

جدول ۳-۱. اثر تغییر مکان افقی لولای O بر پارامترهای عملکردی موتور

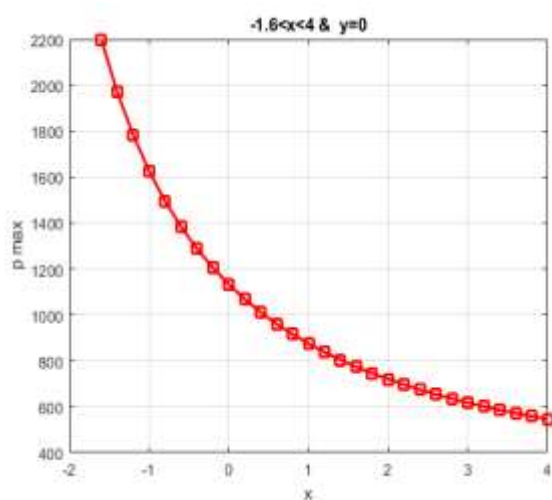
x	y	V min	V max	W	P min	P max
-2	0	-1.8336	62.3549	3.3597e+04	153.0420	2.8473e+03
-1.8	0	-0.1528	64.7063	3.0412e+04	156.5250	2.4846e+03
-1.6	0	1.5799	67.1128	2.7711e+04	159.8512	2.1993e+03
-1.4	0	3.3640	69.5743	2.5387e+04	163.0195	1.9700e+03
-1.2	0	5.1988	72.0904	2.3365e+04	166.0297	1.7825e+03
-1	0	7.0839	74.6611	2.1589e+04	168.8823	1.6268e+03
-0.8	0	9.0189	77.2863	2.0014e+04	171.5788	1.4957e+03
-0.6	0	11.0031	79.9661	1.8610e+04	174.1212	1.3841e+03
-0.4	0	13.0364	82.7006	1.7349e+04	176.5122	1.2882e+03
-0.2	0	15.1182	85.4899	1.6211e+04	178.7548	1.2050e+03
0	0	17.2484	88.3345	1.5180e+04	180.8527	1.1322e+03
0.2	0	19.4266	91.2347	1.4241e+04	182.8096	1.0682e+03
0.4	0	21.6527	94.1910	1.3383e+04	184.6295	1.0114e+03
0.6	0	23.9264	97.2039	1.2597e+04	186.3168	960.7272
0.8	0	26.2476	100.2742	1.1875e+04	187.8758	915.3345
1	0	28.6162	103.4026	1.1209e+04	189.3109	874.4478
1.2	0	31.0322	106.5900	1.0594e+04	190.6265	837.4552
1.4	0	33.4956	109.8375	1.0025e+04	191.8270	803.8480
1.6	0	36.0064	113.1460	9.4964e+03	192.9168	773.2009
1.8	0	38.5646	116.5170	9.0053e+03	193.9001	745.1549
2	0	41.1705	119.9518	8.5481e+03	194.7811	719.4063
2.2	0	44.0200	123.2121	8.1059e+03	195.5637	695.6957
2.4	0	46.7568	126.7308	7.7058e+03	196.2518	673.8013
2.6	0	49.5446	130.3132	7.3314e+03	196.8489	653.5314
2.8	0	52.3837	133.9611	6.9807e+03	197.3585	634.7207
3	0	55.2746	137.6763	6.6516e+03	197.7838	617.2252
3.2	0	58.2178	141.4612	6.3425e+03	198.1277	600.9196
3.4	0	61.2137	145.3180	6.0518e+03	198.3931	585.6941
3.6	0	64.2630	149.2495	5.7782e+03	198.5822	571.4524
3.8	0	67.3664	153.2587	5.5202e+03	198.6972	558.1097
4	0	70.5247	157.3488	5.2768e+03	198.7399	545.5915



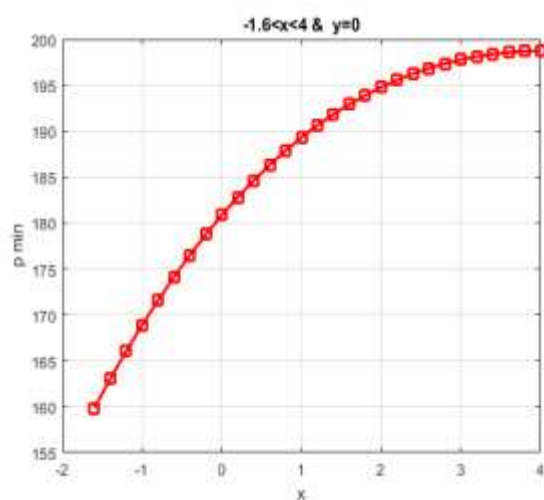
شکل ۳-۳. اثر تغییرات x بر V_{max} .



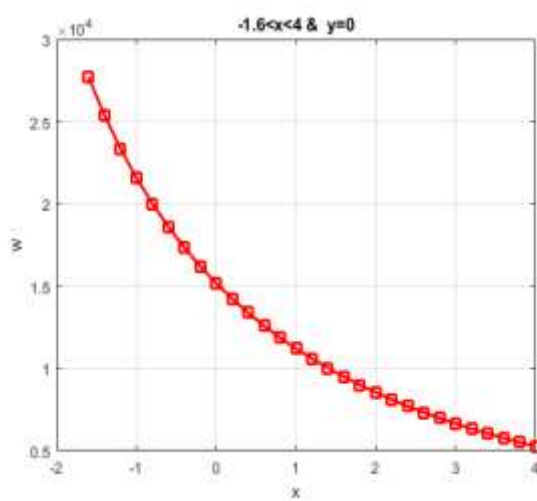
شکل ۳-۲. اثر تغییرات x بر V_{min} .



شکل ۳-۵. اثر تغییرات x بر P_{max} .



شکل ۳-۴. اثر تغییرات x بر P_{min} .



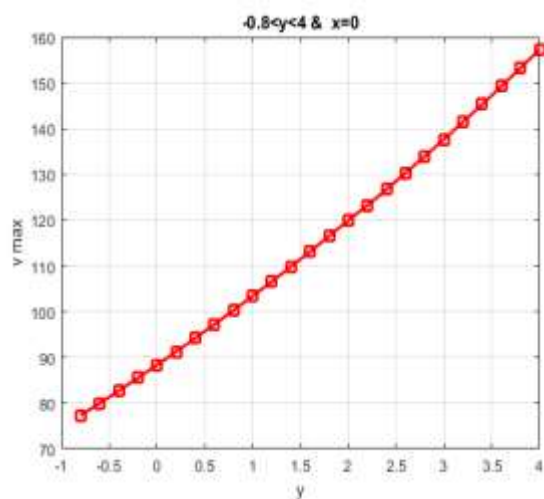
شکل ۳-۶. اثر تغییرات x بر W .

۳-۴-۲- تغییر مکان لولای O در راستای محور y

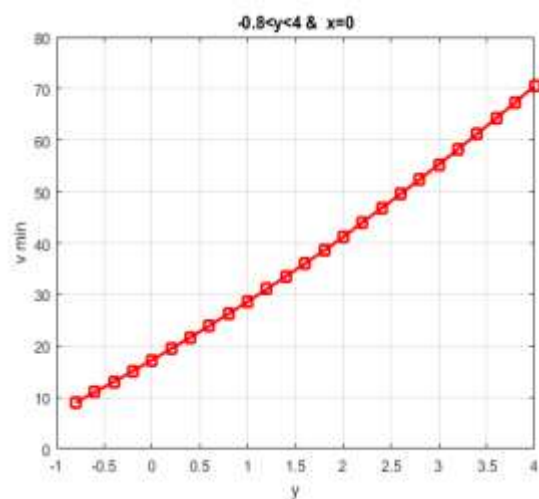
در این حالت، و براساس تغییر مکان لولا در راستای قائم، مقدار پارامتر X در معادلات برابر صفر منظور خواهد شد. در ادامه و با تغییر مقدار y، می توان عملکرد موتور را مورد بررسی قرار داد. در جدول ۲-۳ مقادیر عددی تاثیر پارامتر y بر V_{min} ، V_{max} ، P_{min} ، P_{max} و W را نشان می دهد. درواقع براساس این مقادیر می توان دریافت تغییر مکان لولای موردنظر در راستای قائم چه تاثیری بر عملکرد موتور دارد. همچنین طبق جدول ۲-۳ مقادیر کلی برای y در بازه [4 -2] است که با گامهای ۰/۲ تغییر می کند. در شکل های ۷-۳ تا ۱۱-۳ اثر پارامتر y بر پنج پارامتر ذکر شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در این قسمت از نتایج نیز به علت کاهش فشار ماکزیمم و فشار مینیمم با افزایش y سطح نمودار P-V کاهش پیدا کرده، در نتیجه مقدار کار خروجی کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که با حذف مقادیر منفی باید $0/8 < y < 4$ - در نظر گرفته شود.

جدول ۳-۲. اثر تغییر مکان قائم لولای O بر پارامترهای عملکردی موتور.

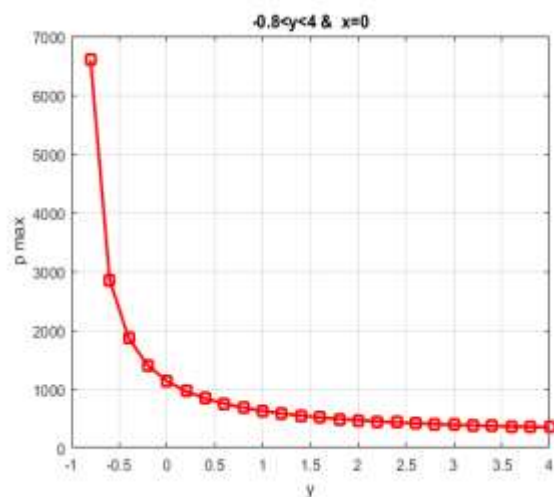
x	y	V_min	V_max	W	P min	P max
0	-2	-1.8336	62.3549	1.9193e+06	-1.3137e+06	6.1656e+07
0	-1.8	-0.1528	64.7063	2.8242e+05	-5.5715e+06	6.6400e+06
0	-1.6	1.5799	67.1128	1.2237e+04	-9.2987e+05	1.3479e+06
0	-1.4	3.3640	69.5743	3.6997e+06	-1.3279e+06	1.3167e+08
0	-1.2	5.1988	72.0904	2.3919e+05	-1.9186e+06	1.0816e+07
0	-1	7.0839	74.6611	4.2626e+05	-1.5587e+07	1.9771e+06
0	-0.8	9.0189	77.2863	6.5100e+04	188.7343	6.5982e+03
0	-0.6	11.0031	79.9661	3.4976e+04	186.4321	2.8547e+03
0	-0.4	13.0364	82.7006	2.4359e+04	184.3688	1.8586e+03
0	-0.2	15.1182	85.4899	1.8720e+04	182.5169	1.3977e+03
0	0	17.2484	88.3345	1.5180e+04	180.8527	1.1322e+03
0	0.2	19.4266	91.2347	1.2740e+04	179.3560	959.8224
0	0.4	21.6527	94.1910	1.0954e+04	178.0093	838.9356
0	0.6	23.9264	97.2039	9.5891e+03	176.7975	749.5730
0	0.8	26.2476	100.2742	8.5131e+03	175.7075	680.8966
0	1	28.6162	103.4026	7.6436e+03	174.7277	626.5265
0	1.2	31.0322	106.5900	6.9270e+03	173.8481	582.4624
0	1.4	33.4956	109.8375	6.3266e+03	173.0598	546.0688
0	1.6	36.0064	113.1460	5.8169e+03	172.3549	515.5391
0	1.8	38.5646	116.5170	5.3790e+03	171.7266	489.5934
0	2	41.1705	119.9518	4.9992e+03	171.1687	467.2998
0	2.2	44.0200	123.2121	4.6577e+03	170.6758	447.9637
0	2.4	46.7568	126.7308	4.3638e+03	170.2429	431.0572
0	2.6	49.5446	130.3132	4.1027e+03	169.8657	416.1714
0	2.8	52.3837	133.9611	3.8695e+03	169.5403	402.9856
0	3	55.2746	137.6763	3.6600e+03	169.2633	391.2441
0	3.2	58.2178	141.4612	3.4709e+03	169.0314	380.7411
0	3.4	61.2137	145.3180	3.2994e+03	168.8419	371.3093
0	3.6	64.2630	149.2495	3.1432e+03	168.6923	362.8109
0	3.8	67.3664	153.2587	3.0005e+03	168.5803	355.1322
0	4	70.5247	157.3488	2.8697e+03	168.5039	348.1781



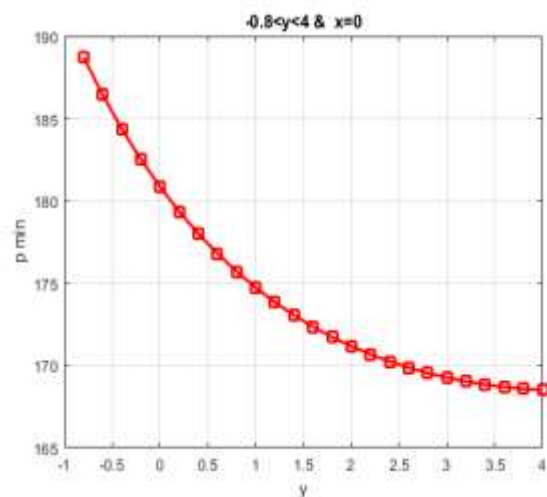
شکل ۳-۸. اثر تغییرات y بر V_{max} .



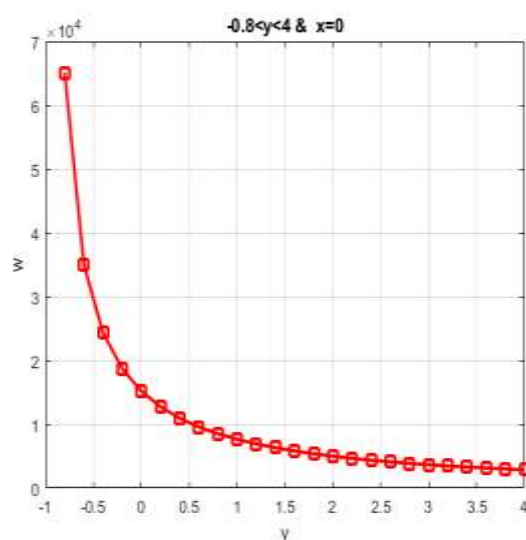
شکل ۳-۷. اثر تغییرات y بر V_{min} .



شکل ۳-۱۰. اثر تغییرات y بر P_{max} .



شکل ۳-۹. اثر تغییرات y بر P_{min} .



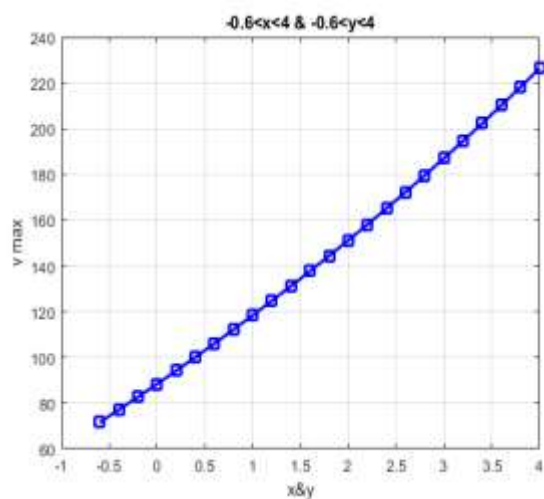
شکل ۳-۱۱. اثر تغییرات y بر W .

۳-۴-۳- تغییر مکان لولای O در راستای خط O_1

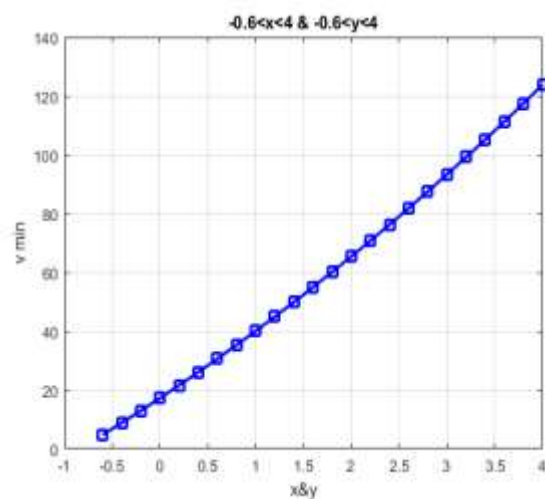
در این حالت فرض می‌شود لولای موردنظر بتواند در راستای خط O_1 ، که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است حرکت نماید. با توجه به اینکه این خط در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محورهای مختصات قرار دارد، بنابراین مقادیر x و y در این حالت برابر هم خواهند بود. در ادامه و با تغییر این مقدار ثابت، می‌توان عملکرد موتور را مورد بررسی قرار داد. در جدول ۳-۳ اثر تغییر x و y با بازه‌های یکسان بر پارامترها بررسی شده است. در شکل‌های ۳-۱۲ تا ۳-۱۶ نیز نمودار مربوط به هر پارامتر بررسی شده است. در این قسمت با کاهش شدید فشار ماکزیمم با افزایش x و y و کاهش سطح نمودار P-V کار خروجی بشدت کاهش پیدا می‌کند. با توجه به مقادیر قید طراحی یعنی فشار و حجم‌های منفی x و y باید بین ۰/۶- تا ۴ طراحی شوند.

جدول ۳-۳. اثر تغییر مکان لولای موردنظر در راستای خط O_1 بر پارامترهای عملکردی موتور.

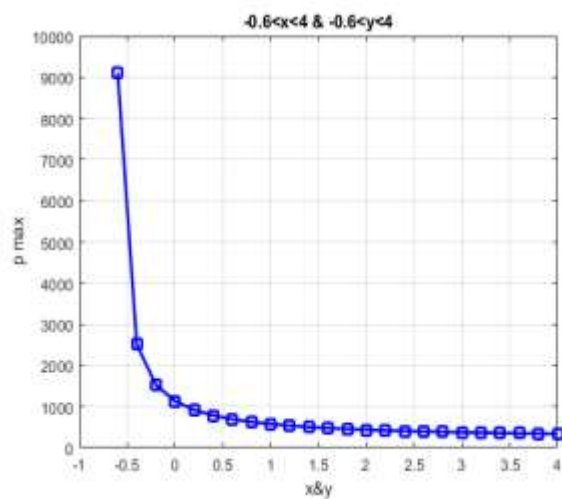
x	y	V_min	V_max	W	P min	P max
-2	-2	-20.4409	35.9746	5.2412e+04	-1.0580e+06	6.9979e+05
-1.8	-1.8	-17.1801	40.7567	6.7502e+04	-1.8658e+06	4.3551e+05
-1.6	-1.6	-13.8010	45.6395	5.0436e+04	-1.2004e+06	5.5531e+05
-1.4	-1.4	-10.3058	50.6230	1.1959e+05	-2.7284e+06	1.5957e+06
-1.2	-1.2	-6.6969	55.7069	1.4930e+05	-1.3095e+06	9.9275e+06
-1	-1	-2.9762	60.8915	1.0033e+05	-8.0454e+05	1.8594e+07
-0.8	-0.8	0.8546	66.1769	1.4320e+06	-7.0382e+08	1.1294e+06
-0.6	-0.6	4.7938	71.5634	7.9185e+04	179.1624	9.1124e+03
-0.4	-0.4	8.8400	77.0514	3.1326e+04	179.8116	2.5088e+03
-0.2	-0.2	12.9919	82.6416	2.0377e+04	180.3699	1.5275e+03
0	0	17.2484	88.3345	1.5180e+04	180.8527	1.1322e+03
0.2	0.2	21.6085	94.1311	1.2084e+04	181.2723	918.7417
0.4	0.4	26.0715	100.0323	1.0011e+04	181.6388	785.0714
0.6	0.6	30.6365	106.0392	8.5178e+03	181.9600	693.5188
0.8	0.8	35.3031	112.1531	7.3869e+03	182.2427	626.8966
1	1	40.0709	118.3755	6.4985e+03	182.4923	576.2515
1.2	1.2	44.9394	124.7078	5.7807e+03	182.7133	536.4614
1.4	1.4	49.9085	131.1520	5.1874e+03	182.9095	504.3839
1.6	1.6	54.9782	137.7099	4.6881e+03	183.0840	477.9843
1.8	1.8	60.1484	144.3838	4.2612e+03	183.2396	455.8871
2	2	65.4195	151.1762	3.8915e+03	183.3785	437.1293
2.2	2.2	70.7916	158.0897	3.5676e+03	183.5026	421.0163
2.4	2.4	76.2651	165.1272	3.2810e+03	183.6138	407.0350
2.6	2.6	81.8407	172.2919	3.0251e+03	183.7132	394.7978
2.8	2.8	87.5190	179.5876	2.7947e+03	183.8023	384.0071
3	3	93.3009	187.0181	2.5856e+03	183.8820	374.4300
3.2	3.2	99.1871	194.5878	2.3946e+03	183.9532	365.8826
3.4	3.4	105.1789	202.3015	2.2190e+03	184.0168	358.2171
3.6	3.6	111.2776	210.1645	2.0564e+03	184.0734	351.3139
3.8	3.8	117.4844	218.1829	1.9050e+03	184.1236	345.0755
4	4	123.8010	226.3630	1.7631e+03	184.1678	339.4212



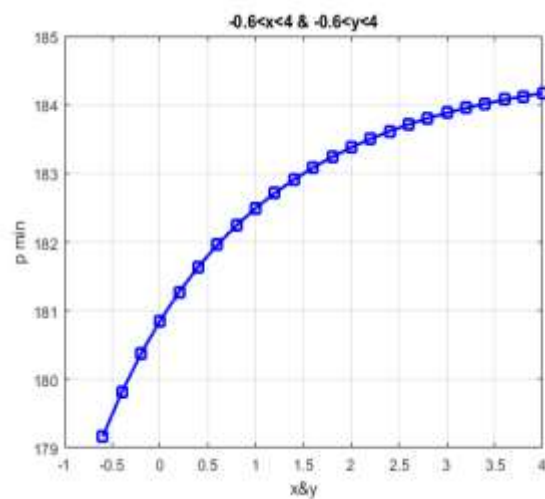
شکل ۳-۱۳. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر V_{max} .



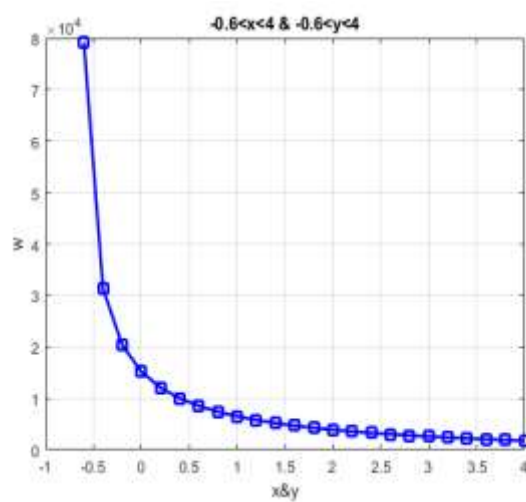
شکل ۳-۱۲. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر V_{min} .



شکل ۳-۱۵. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر P_{max} .



شکل ۳-۱۴. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر P_{min} .



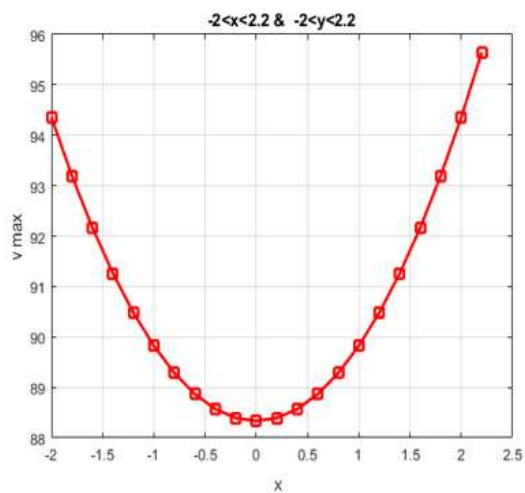
شکل ۳-۱۶. اثر تغییر مکان در راستای خط O_1 بر W .

۳-۴-۴- تغییر مکان لولای O در راستای خط O_2

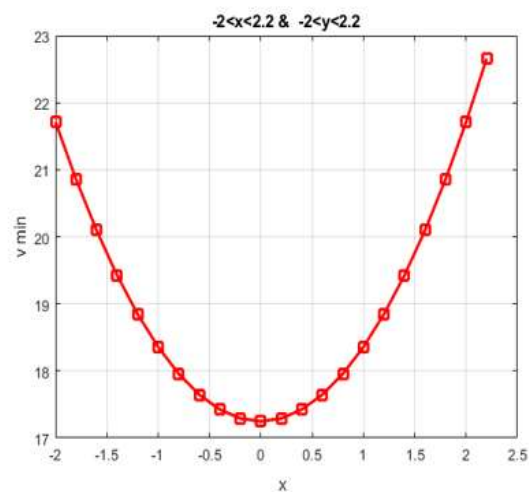
در قسمت پایانی این بخش فرض می‌شود لولای موردنظر بتواند در راستای خط O_2 ، که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است حرکت نماید. با توجه به اینکه این خط در زاویه 45° نسبت به محورهای مختصات قرار دارد، بنابراین قدرمطلق مقادیر x و y در این حالت برابر هم خواهند بود، اما دو متغیر دارای علامت‌های قرینه خواهند بود. در ادامه می‌توان عملکرد موتور را مورد بررسی قرار داد. همانطور که در جدول ۳-۴ و نمودارهای ۳-۱۷ تا ۳-۲۱ مشاهده می‌شود در قسمت‌های ابتدایی بازه های x و y نسبت به انتهای آنها فشار ماکزیمم بسیار پایین می‌باشد در نتیجه همانطور که نمودار ۳-۲۰ نشان می‌دهد به یکباره در انتهای بازه x و y کار خروجی افزایش می‌یابد که علت این امر افزایش ناگهانی سطح زیر نمودار $P-V$ است.

جدول ۳-۴. اثر تغییر مکان لولای موردنظر در راستای خط O_2 بر پارامترهای عملکردی موتور.

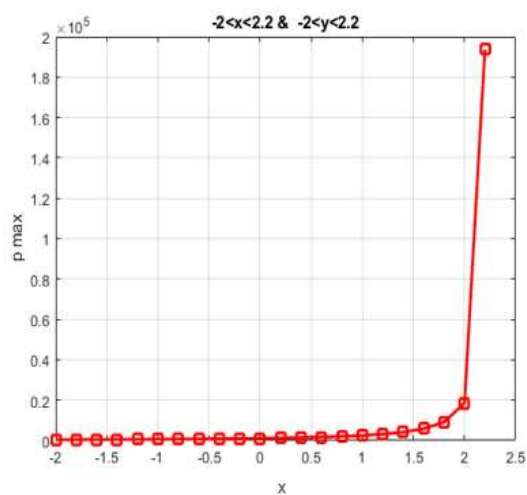
x	y	Vmin	Vmax	w	Pmin	Pmax
-2	2	21.7112	94.3592	5.7782e+03	152.5330	473.6828
-1.8	1.8	20.8579	93.2010	6.2301e+03	154.6716	504.0805
-1.6	1.6	20.0965	92.1701	6.7449e+03	156.9592	538.7635
-1.4	1.4	19.4264	91.2648	7.3335e+03	159.3990	578.5328
-1.2	1.2	18.8470	90.4834	8.0091e+03	161.9936	624.3895
-1	1	18.3576	89.8244	8.7882e+03	164.7448	677.5991
-0.8	0.8	17.9578	89.2869	9.6913e+03	167.6537	739.7817
-0.6	0.6	17.6472	88.8697	1.0744e+04	170.7205	813.0404
-0.4	0.4	17.4256	88.5722	1.1979e+04	173.9442	900.1509
-0.2	0.2	17.2927	88.3939	1.3439e+04	177.3228	1.0048e+03
0	0	17.2484	88.3345	1.5180e+04	180.8527	1.1322e+03
0.2	-0.2	17.2927	88.3939	1.7277e+04	184.5289	1.2896e+03
0.4	-0.4	17.4256	88.5722	1.9833e+04	188.3448	1.4873e+03
0.6	-0.6	17.6472	88.8697	2.2995e+04	192.2921	1.7412e+03
0.8	-0.8	17.9578	89.2869	2.6980e+04	196.3602	2.0760e+03
1	-1	18.3576	89.8244	3.2122e+04	200.5372	2.5330e+03
1.2	-1.2	18.8470	90.4834	3.8972e+04	204.8086	3.1861e+03
1.4	-1.4	19.4264	91.2648	4.8516e+04	209.1584	4.1814e+03
1.6	-1.6	20.0965	92.1701	6.2763e+04	213.5680	5.8539e+03
1.8	-1.8	20.8579	93.2010	8.6707e+04	218.0175	9.1737e+03
2	-2	21.7112	94.3592	1.3866e+05	222.4847	1.8596e+04
2.2	-2.2	22.6574	95.6471	5.3768e+05	226.9460	1.9372e+05
2.4	-2.4	23.6973	97.0670	1.2627e+06	-1.4525e+07	7.0568e+07
2.6	-2.6	24.8320	98.6218	6.2743e+05	-2.5725e+07	2.8116e+06
2.8	-2.8	26.0628	100.3146	8.8974e+04	-4.5737e+06	7.1159e+06
3	-3	27.3908	102.1491	3.8860e+05	-1.3057e+07	1.5909e+06
3.2	-3.2	28.8174	104.1292	1.6465e+07	-2.0036e+06	6.3382e+08
3.4	-3.4	30.3442	106.2594	1.0204e+05	-3.7305e+06	1.6449e+07
3.6	-3.6	31.9730	108.5448	4.3810e+05	-1.4556e+07	8.0896e+06
3.8	-3.8	33.7054	110.9911	8.9614e+03	-1.9268e+06	1.2293e+07
4	-4	35.5435	113.6047	3.2330e+05	-1.0180e+07	1.6518e+06



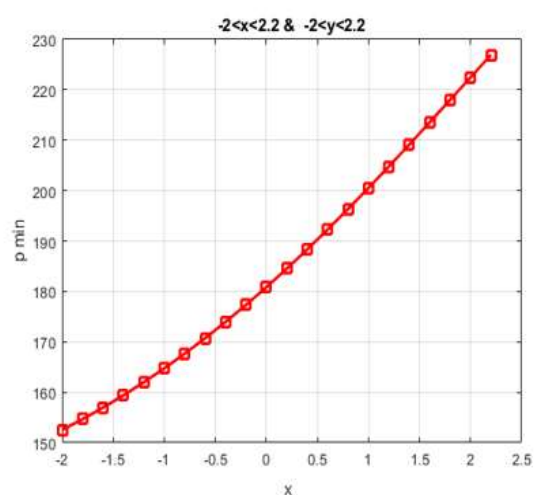
شکل ۳-۱۸. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر V_{max}



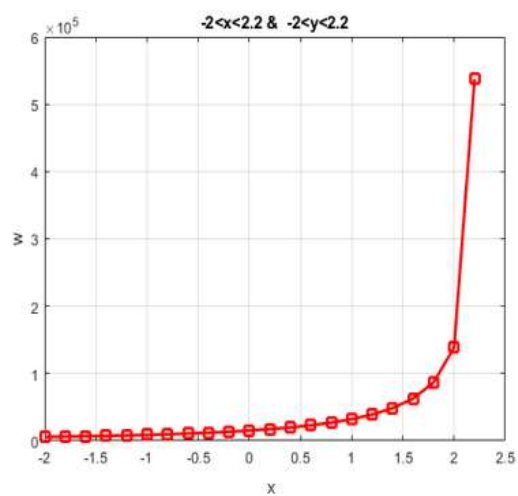
شکل ۳-۱۷. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر V_{min}



شکل ۳-۲۰. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر P_{max}



شکل ۳-۱۹. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر P_{min}



شکل ۳-۲۱. اثر تغییر مکان در راستای خط O_2 بر W

فصل ۴: بهینه‌سازی و نتایج

در این فصل به بهینه‌سازی موتور استرلینگ نوع آلفا در دو حالت پرداخته خواهد شد. در حالت اول، یک موتور نسبت متغیر در نظر گرفته می‌شود، بگونه‌ای که انتقال مکان لولای O به بهترین نقطه ممکن، براساس افزایش کار خروجی، مدنظر خواهد بود. در این حالت ساختار و ابعاد هندسی آن ثابت است و هدف فقط جابجایی لولا می‌باشد. اما در حالت دوم کل مشخصه‌های هندسی موتور به همراه مختصات نقطه O بهینه خواهند شد تا بتوان بهترین موتور ممکن براساس افزایش کار خروجی را بدست آورد.

مقادیر ثابت پارامترهای دینامیکی برای موتور در نظر گرفته شده در این پژوهش براساس جدول ۴-۱ می‌باشند.

جدول ۴-۱. مقادیر ثابت پارامترهای ترمودینامیکی [۴۴].

پارامتر	مقدار
ثابت جهانی گازها (R) $\frac{cm^3 kpa}{K.mol}$	8.314×10^3
فشار متوسط (P_{mean}) kpa	۱۰۱/۳۲۵
دمای انقباض (T_c) K	۳۹۸
دمای انبساط (T_e) K	۸۵۰

۴-۱- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

در این پایان‌نامه از دو الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری به نام‌ها الگوریتم ازدحام ذرات^۱ و الگوریتم شیرمورچه^۲ استفاده خواهد شد. در ابتدا به توضیح مختصر این دو الگوریتم پرداخته خواهد شد.

^۱. PSO

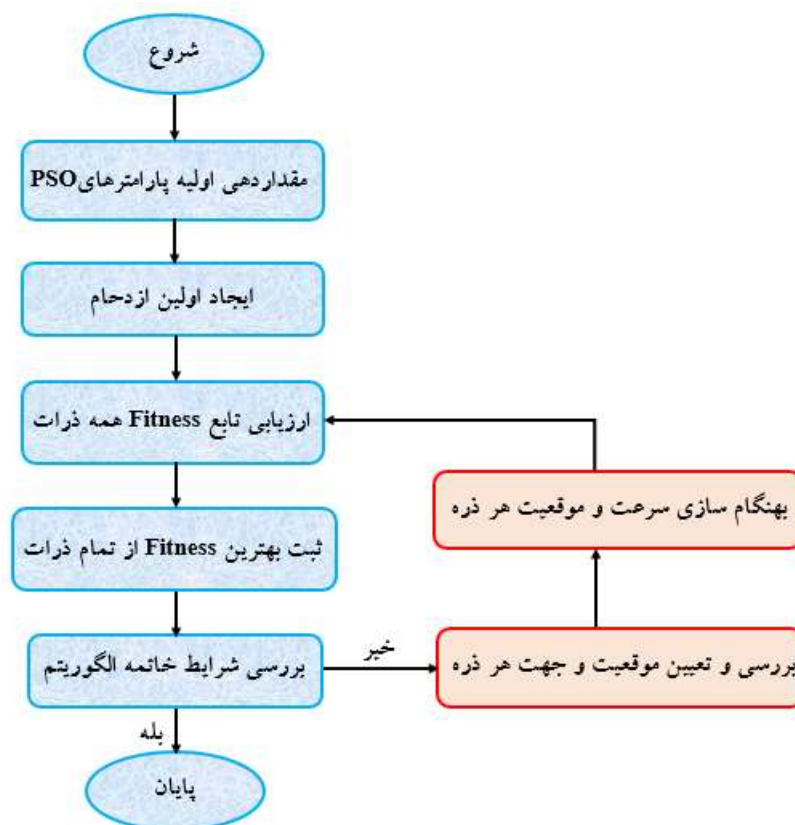
^۲. ALO

۴-۱-۱- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت معرفی شد و مبتنی بر رفتار ازدحامی پرندگان می باشد [۳]. این الگوریتم، همانند الگوریتم ژنتیک، از قوی ترین و پرکاربردترین روش های بهینه سازی مورد استفاده توسط پژوهشگران می باشد. هر پرنده (ذره) برای یافتن منبع غذایی (نقطه بهینه) علاوه بر دانش شخصی، از اطلاعات کل گروه نیز بهره می برد. در واقع، اگر یک ذره یک مسیر مناسب برای غذا را تشخیص دهد، یا مسیری را برای رسیدن به حداکثر نقطه در مساله بهینه سازی 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 می آید و سپس با استفاده از سرعت، مقادیر مکانی هر ذره برورسانی می شود. مقادیر سرعت و مکان هر ذره در این الگوریتم در هر تکرار طبق روابط زیر قابل محاسبه می باشد.

$$\begin{aligned}
 X_j(i) &= X_j(i-1) + V_j(i) \quad j = 1, 2, 3 \dots N \\
 V_j(i) &= \gamma(i)V_j(i-1) + c_1 u_1 (P_{Best,j} - X_j(i-1)) + \\
 &\quad c_2 u_2 (G_{Best,j} - X_j(i-1)) \quad j = 1, 2, 3 \dots N
 \end{aligned}
 \tag{۱-۴}$$

که c_1 و c_2 ثابت هایی هستند که به ترتیب به عنوان ضرایب یادگیری شناختی فردی و اجتماعی (گروهی) شناخته می شوند. مقادیر این ثابت ها معمولاً ۲ است. u_1 و u_2 نیز دو عدد تصادفی هستند. در نهایت، یک عامل وزنی، که توسط $\gamma(i)$ نشان داده می شود، در این رویکرد استفاده می شود، که می تواند ثابت یا متغیر (بین ۰ و ۱) باشد. این فاکتور معمولاً با افزایش تعداد تکرارها به صورت کاهشی در نظر گرفته می شود [۴].



شکل ۴-۱. فلوچارت الگوریتم PSO.

۴-۱-۲- الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO)

الگوریتم بهینه‌سازی شیر مورچه (ALO) از مکانیزم شکار شیر مورچه در طبیعت تقلید می‌کند [۵-۶]. پنج گام اصلی شکار طعمه عبارتند از راه رفتن تصادفی مورچه‌ها، ساختن تله، به دام انداختن مورچه‌ها در تله، گرفتن طعمه و بازسازی تله. این الگوریتم قادر به یافتن نتایج بسیار رقابتی از نظر اجتناب از بهینه محلی و همگرایی است.

برای مدل‌سازی چنین فعل و انفعالاتی، مورچه‌ها نیاز به حرکت در فضاییکه در جستجو دارند و شیر مورچه اجازه دارد آن‌ها را با استفاده از تله شکار کند و متناسب تر شود. از آنجا که مورچه‌ها هنگام جستجوی مواد غذایی در طبیعت به طور تصادفی حرکت می‌کنند یک شیوه تصادفی برای مدل‌سازی جنبش مورچه‌ها به شرح زیر انتخاب شده است:

$$X(t) = [0, cumsum(2r(t_1) - 1), cumsum(2r(t_2) - 1), \dots, cumsum(2r(t_n) - 1)] \quad (2-4)$$

که در آن $cumsum$ مجموع تجمعی را محاسبه می‌کند، n حداکثر تعداد تکرار است، t مرحله راه رفتن تصادفی را نشان می‌دهد (تکرار در این تحقیق) و $r(t)$ یک تابع تصادفی به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$r(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } rand > 0.5 \\ 0 & \text{if } rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (3-4)$$

$Rand$ یک عدد تصادفی تولید شده با توزیع یکنواخت در بازه $[0 \ 1]$ است موقعیت مورچه‌ها در طول بهینه‌سازی در ماتریس زیر ذخیره شده و استفاده شده است:

$$M_{ant} = \begin{pmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & \dots & A_{1,d} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & \dots & A_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n,1} & A_{n,2} & \dots & \dots & A_{n,d} \end{pmatrix} \quad (4-4)$$

لازم به ذکر است مورچه‌ها شبیه ذرات در PSO یا افراد در GA هستند موقعیت مورچه به پارامترها برای جواب خاص اشاره دارد. ماتریس M_{ANT} برای ذخیره موقعیت همه مورچه‌ها (متغیرهای همه جواب‌ها) در طول بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی هر مورچه یک تابع برازندگی (هدف) در طول بهینه‌سازی استفاده شده است. و ماتریس زیر تابع برازندگی همه مورچه‌ها را ذخیره می‌کند.

$$M_{OA} = \begin{pmatrix} f(A_{1,1}) & A_{1,2} & \dots & \dots & A_{1,d} \\ f(A_{2,1}) & A_{2,2} & \dots & \dots & A_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(A_{n,1}) & A_{n,2} & \dots & \dots & A_{n,d} \end{pmatrix} \quad (5-4)$$

که M_{OA} ماتریس ذخیره برازندگی هر مورچه است، $AL_{i,j}$ مقدار متغیر j ام (بعد) مورچه i ام را نشان می‌دهد، n تعداد مورچه‌ها و f تابع هدف است. علاوه بر مورچه‌ها فرض می‌شود که شیر مورچه‌ها هم در جاهایی از فضای جستجو پنهان شده است. به منظور ذخیره موقعیت و مقادیر برازندگی شان، ماتریس زیر استفاده شده است.

$$M_{ant} = \begin{pmatrix} AL_{1,1} & AL_{1,2} & \cdots & \cdots & AL_{1,d} \\ AL_{2,1} & AL_{2,2} & \cdots & \cdots & AL_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ AL_{n,1} & AL_{n,2} & \cdots & \cdots & AL_{n,d} \end{pmatrix} \quad (۴-۶)$$

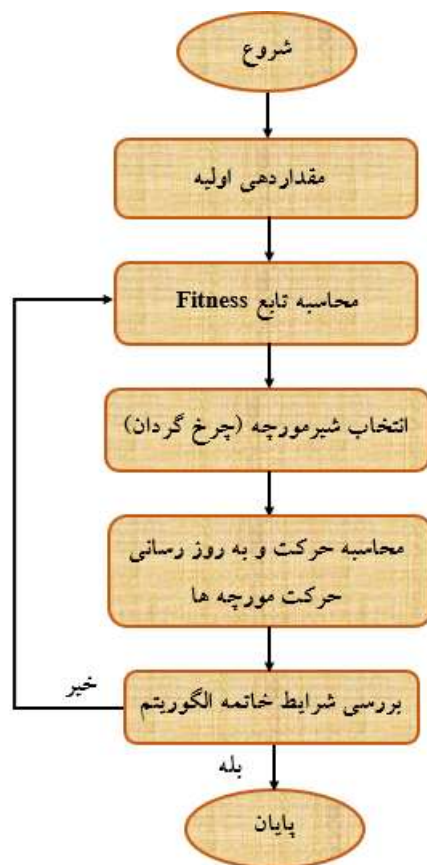
که $M_{Antlion}$ ماتریس ذخیره برازندگی هر شیر مورچه است، $AL_{i,j}$ مقدار متغیر j ام (بعد) شیر مورچه i ام را نشان می‌دهد، n نیز تعداد شیر مورچه‌ها و d تعداد متغیر (بعد) است.

$$M_{ant} = \begin{pmatrix} f(AL_{1,1}) & AL_{1,2} & \cdots & \cdots & AL_{1,d} \\ f(AL_{2,1}) & AL_{2,2} & \cdots & \cdots & AL_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(AL_{n,1}) & AL_{n,2} & \cdots & \cdots & AL_{n,d} \end{pmatrix} \quad (۴-۷)$$

که M_{OAL} ماتریس ذخیره برازندگی هر شیر مورچه است، $AL_{i,j}$ مقدار متغیر j ام (بعد) مورچه i ام می‌باشد و n تعداد شیر مورچه‌ها و f تابع هدف است. به صورت تئوری با توجه به دلایل زیر، الگوریتم پیشنهادی ALO قادر به تخمین بهینه کلی مسایل بهینه‌سازی است [۷]:

- اکتشاف فضای جستجو با انتخاب تصادفی شیر مورچه و راه رفتن تصادفی مورچه‌ها حول آن تضمین شده است.
- بهره‌برداری از فضای جستجو توسط مرزهای کوچک شده تطبیقی تله‌های شیر مورچه تضمین شده است.

- با توجه به استفاده از راه رفتن تصادفی و چرخ رولت احتمال بالا برای فرار از بهینه محلی وجود دارد.
- ALO یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است، بنابر این احتمال اجتناب از بهینه محلی ذاتا بالاست.
- شدت جنبش مورچه‌ها به طور انطباقی در طی هر تکرار کاهش می‌یابد که همگرایی الگوریتم ALO را تضمین می‌کند.
- محاسبه راه رفتن تصادفی برای هر بعد و هر مورچه تنوع را در جمعیت ارتقا می‌دهد.
- تغییر موقعیت شیر مورچه به موقعیت بهترین مورچه‌ها در طول بهینه‌سازی باعث می‌شود مناطق امیدوار کننده در فضای جستجو ذخیره شود.
- بهترین شیر مورچه در هر تکرار ذخیره می‌شود و با بهترین شیر مورچه‌ی که تاکنون به دست آمده (نخبه) مقایسه می‌شود.
- الگوریتم ALO دارای پارامترهای بسیار کمی برای تنظیم است.
- الگوریتم ALO یک الگوریتم با شیب آزاد است و مساله را به عنوان جعبه سیاه در نظر می‌گیرد.



شکل ۴-۲. فلوچارت الگوریتم ALO.

جدول زیر مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای دو الگوریتم را نشان می دهد.

جدول ۴-۲. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم های بهینه سازی.

پارامتر	PSO	ALO
تعداد تکرار	۲۰۰	۲۰۰
جمعیت	۱۰۰	۱۰۰
ضریب سرعت	۰/۵	-
ضریب کاهش سرعت	۰/۸	-
ضریب یادگیری فردی	۲	-
ضریب یادگیری اجتماعی	۲	-

۴-۲- بهینه‌سازی حالت ۱: بهینه‌سازی موتور بر اساس مفهوم

نسبت تراکم متغیر

در این قسمت به بهینه‌سازی متغیرهای x و y نقطه O (شکل ۳-۱) پرداخته می‌شود. هدف از بهینه‌سازی افزایش کار خروجی موتور براساس حرکت لولای O می‌باشد.

$$\max F = W$$

$$P_{min} \leq P \leq P_{max} \quad (۴-۸)$$

$$Lb_i \leq X_i \leq Ub_i$$

$$X = [x, y]$$

که در رابطه فوق F تابع هدف مساله بهینه‌سازی و W مقدار کار خروجی موتور می‌باشد. همچنین X بردار متغیرهای طراحی مساله و Ub_i و Lb_i به ترتیب محدوده‌های بالا و پایین متغیرهای طراحی می‌باشند که در جدول ۴-۳ آورده شده‌اند. در این جدول کمینه و بیشینه تغییرات دو متغیر طراحی جهت فرایند بهینه‌سازی نشان داده شده است. این محدوده‌ها براساس آنالیزهای انجام‌شده در فصل قبل بدست آمده‌اند.

جدول ۴-۳. محدوده مجاز تغییرات متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی حالت ۱

متغیر	مقادیر
$x \text{ (cm)}$	کمینه (Lb) -2
	بیشینه (Ub) 4
$y \text{ (cm)}$	کمینه (Lb) -2
	بیشینه (Ub) 4

پارامترهای هندسی موتور برای این قسمت ثابت بوده و همان پارامترهای موتور مرجع [۴۴] می‌باشند. در جدول ۴-۴ مقادیر پارامترهای هندسی موتور که در این حالت از بهینه‌سازی ثابت می‌باشند ارائه شده است.

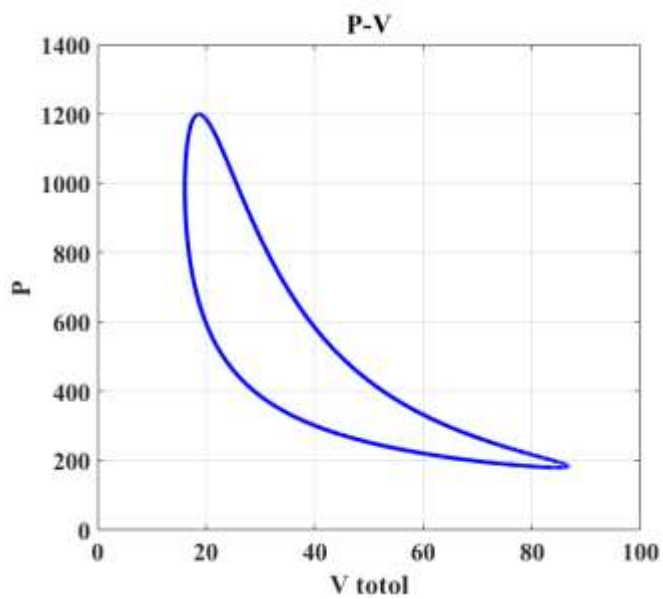
جدول ۴-۴. مقادیر پارامترهای هندسی موتور [۴۴].

پارامتر	مقدار
$l_1 (cm)$	۱۰
$l_2 (cm)$	۱۰
$r_1 = r_2 (cm)$	۲
$E_r (cm)$	۲
$C_r (cm)$	۲

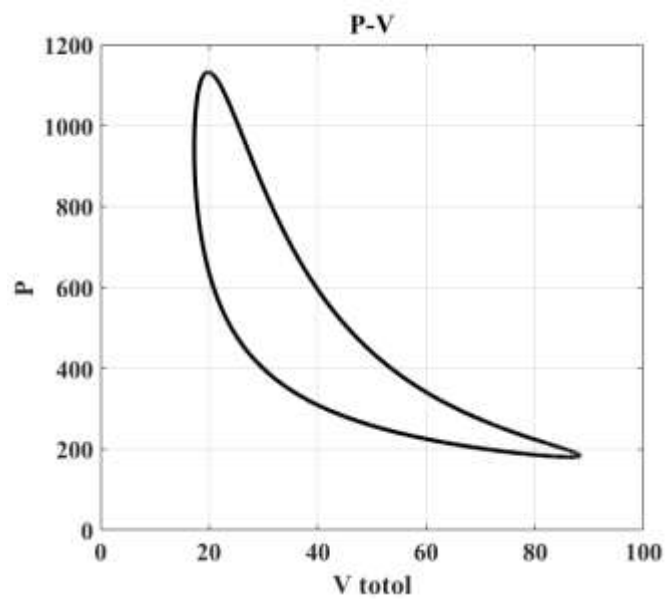
نتایج بهینه سازی موتور نسبت تراکم متغیر با دو روش بهینه سازی در جدول ۴-۵ نشان داده شده است. علاوه بر این، نمودار فشار حجم برای موتور بهینه و مقایسه آن با موتور اصلی، و تغییر در مقادیر تابع هدف برای تکرارهای مختلف، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و شیر مورچه به ترتیب در شکل های ۴-۳ و ۴-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود کار خروجی بهینه شده توسط الگوریتم شیر مورچه تا حدودی بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات می باشد. همچنین نتایج حاکی از بهتر بودن کار خروجی موتور نسبت تراکم متغیر نسبت به موتور اصلی در حالت نسبت تراکم ثابت است.

جدول ۴-۵. نتایج بهینه سازی برای موتور استرلینگ نوع آلفا در حالت ۱.

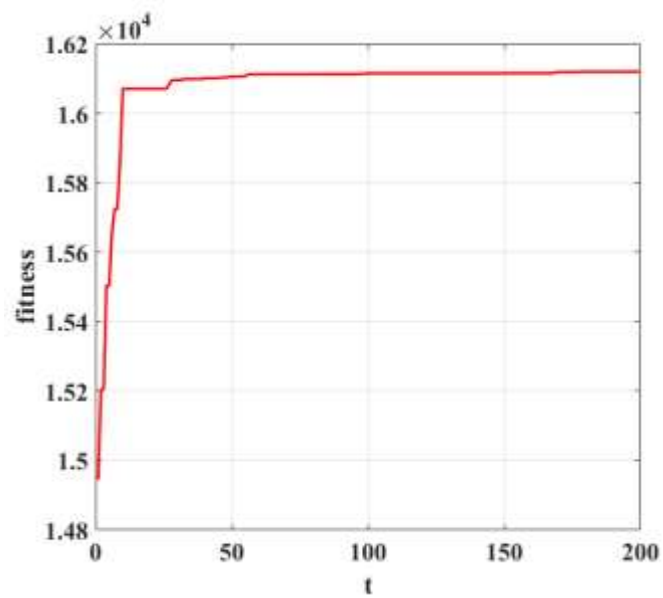
پارامتر	موتور اصلی [۴۴]	مقادیر بهینه PSO	مقادیر بهینه ALO
$x(cm)$	۰	-۰/۰۷۲۶۵۸	-۰/۰۹۸۳۴۴
$y(cm)$	۰	-۰/۰۳۶۳۹۶	-۰/۰۲۷۸۵۴
$W(kg.\frac{cm}{s^2})$	۱۵۱۷۹/۷۵۳۴	۱۶۱۱۹/۹۰۱۶	۱۶۱۲۴/۵۲۸۲
$\frac{W}{W_0}$	۱	۱/۰۶۱۹	۱/۰۶۲۲



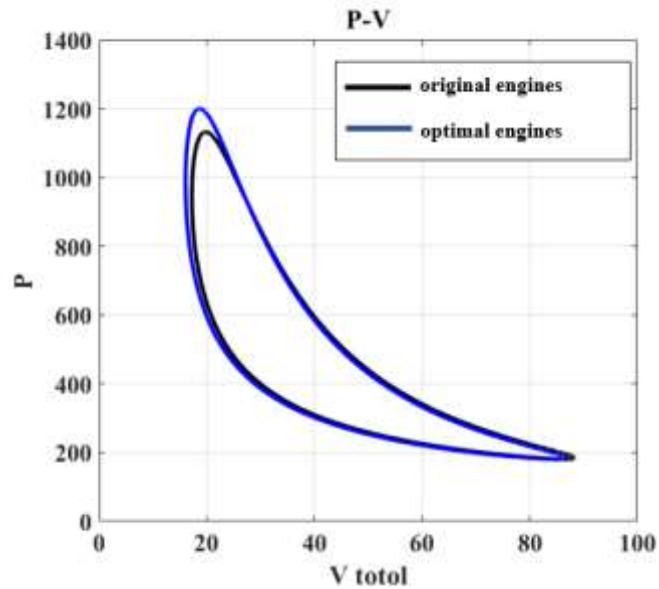
موتور با مکانیزم بهینه.



موتور با مکانیزم اصلی [۴۴].

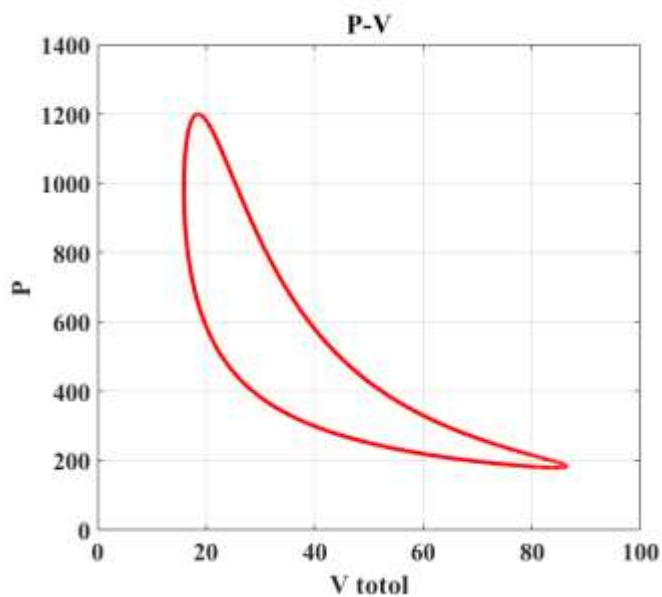


تغییرات تابع هدف.

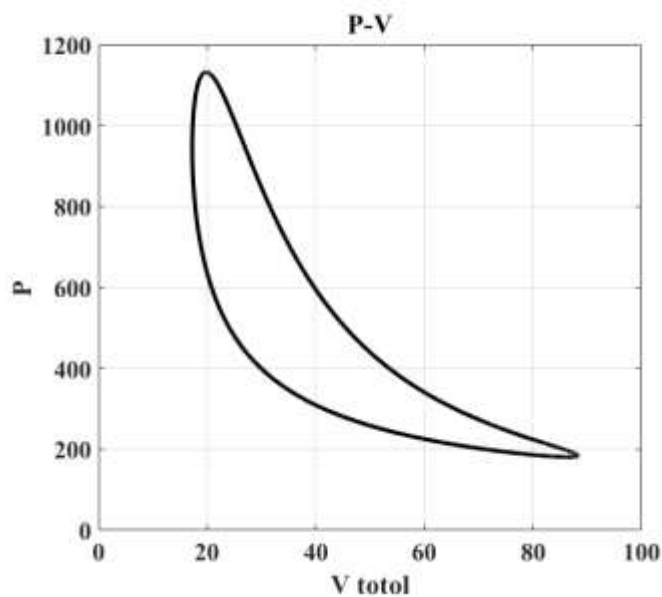


مقایسه مکانیزم اصلی و بهینه.

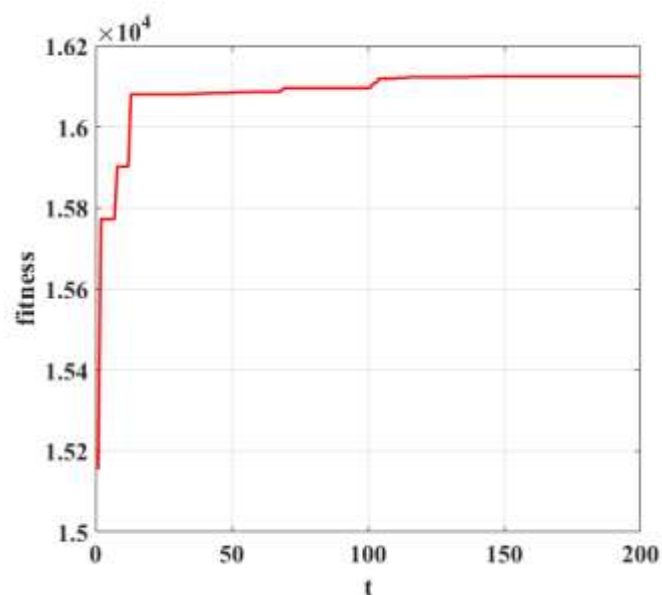
شکل ۳-۴. نتایج بهینه سازی با الگوریتم PSO برای حالت ۱.



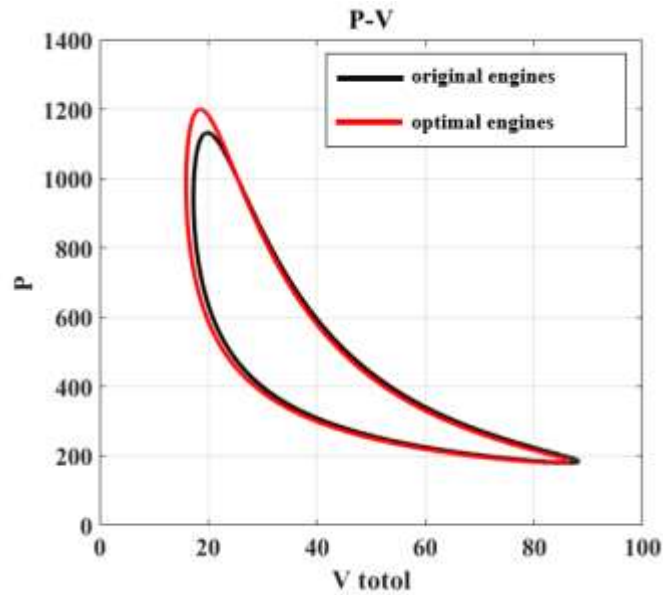
موتور با مکانیزم بهینه.



موتور با مکانیزم اصلی [۴۴].



تغییرات تابع هدف.



مقایسه مکانیزم اصلی و بهینه.

شکل ۴-۴. نتایج بهینه سازی با الگوریتم ALO در حالت ۱.

۴-۳- بهینه سازی حالت ۲: بهینه سازی کلی موتور

کار خروجی به دست آمده برای موتور استرلینگ نوع آلفا 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 در این حالت بطور خلاصه بصورت زیر خواهد بود:

$$\max F = W$$

$$P_{min} \leq P \leq P_{max}$$

$$OS \leq OS_{max} \quad (9-4)$$

$$Lb_i \leq X_i \leq Ub_i$$

$$X = [L_1, L_2, r_1, r_2, E_r, C_r, x, y]$$

که در رابطه فوق F تابع هدف مساله بهینه‌سازی و W مقدار کار خروجی موتور می‌باشد. همچنین X بردار متغیرهای طراحی مساله و Ub_i و Lb_i به ترتیب محدوده‌های بالا و پایین متغیرهای طراحی می‌باشند که در جدول ۴-۶ آورده شده‌اند. در رابطه (۹-۴) P_{max} و P_{min} مقادیر کمینه و بیشینه مجاز فشار موتور بوده که با توجه به مرجع [۴۴] به ترتیب ۱۸۰ و ۱۲۰۰ کیلو پاسکال و قید دوم یعنی OS رابطه‌ای به منظور محدود کردن افزایش بیش از حد سایز موتور می‌باشد. براساس معادله ۴-۱۰، رابطه‌ای برای حجم کلی موتور در نظر گرفته شده است و مقدار این رابطه برای موتور اصلی به عنوان قید مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. براساس این معادله، حجم کل موتور که تابعی از اندازه‌های هندسی موتور است، نباید از ۳۰۱/۵۹ سانتی متر بزرگتر شود. این عدد نیز براساس موتور اصلی مرجع [۴۴] می‌باشد.

$$OS = 2\pi r_1^2 \cdot \min(E_r, C_r) + \pi E_r^2 (OE - r_1) + \pi C_r^2 (OD - r_1) \quad (10-4)$$

در این حالت دو پارامتر یعنی x و y نیز به همراه بقیه متغیرهای هندسی موتور بهینه می‌شوند تا بهترین ساختار ممکن برای موتور حاصل شود. در جدول ۴-۶ کمینه و بیشینه متغیرهای طراحی

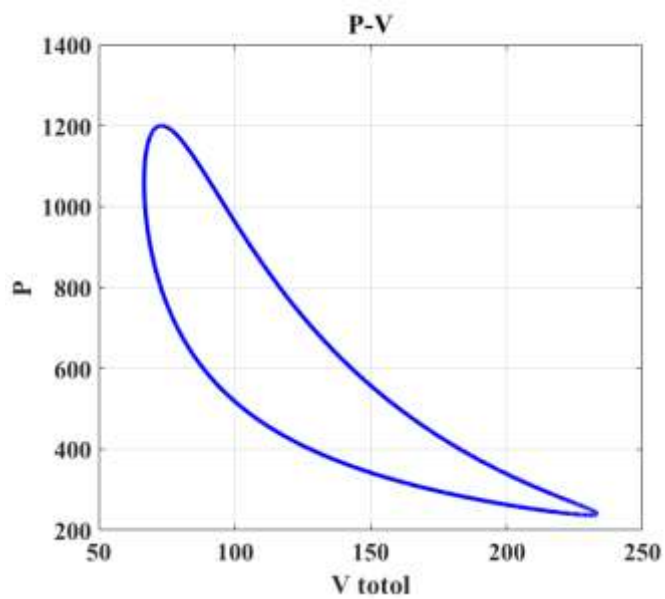
جهت فرایند بهینه‌سازی نشان داده شده است. در جدول ۴-۷ مقادیر بهینه شده متغیرهای طراحی برای دو الگوریتم مورد نظر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پارامترهای l_1 و l_2 به کمترین حد خود رسیده‌اند که علت این امر تعریف قید فضای اشغالی موتور می‌باشد. همچنین نتایج در این قسمت نیز حاکی از بهتر بودن الگوریتم ALO نسبت به الگوریتم PSO در بدست آوردن کار خروجی بوده و در هر دو حالت تقریباً $2/6$ برابر موتور اصلی است. در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ نمودار P-V برای موتور اصلی و موتور بهینه شده در حالت ۲، برای دو الگوریتم PSO و ALO، همراه با تغییر تابع هدف در آنها مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۶. محدوده مجاز متغیرهای طراحی جهت بهینه سازی در حالت ۲.

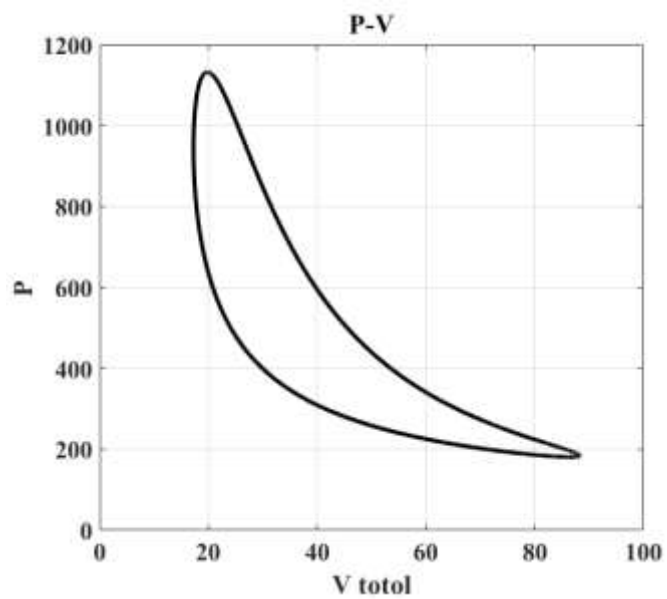
مقادیر	متغیر
۵	کمینه
۷۰	بیشینه
۵	کمینه
۷۰	بیشینه
۱	کمینه
۴	بیشینه
۱	کمینه
۵	بیشینه
۱	کمینه
۸	بیشینه
-2	کمینه
4	بیشینه
-2	کمینه
4	بیشینه

جدول ۴-۷. نتایج بهینه سازی در حالت ۲ برای موتور استرلینگ نوع آلفا.

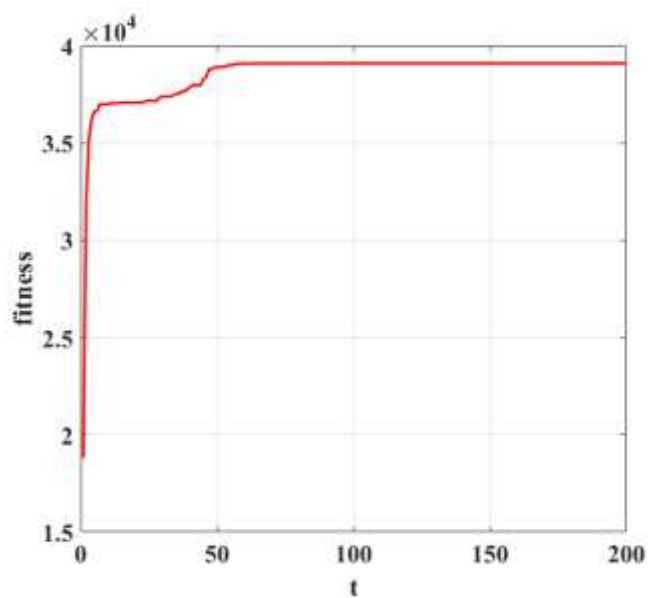
پارامتر	موتور اصلی [۴۴]	مقادیر بهینه PSO	مقادیر بهینه ALO
$l_1 (cm)$	۱۰	۵	۵
$l_2 (cm)$	۱۰	۵	۵
$r_1 = r_2 (cm)$	۲	۲	۲/۰۹۹۹
$E_r (cm)$	۲	۳/۲۲۳۹	۳/۱۲۱۳
$C_r (cm)$	۲	۲/۳۸۵۶	۲/۳۲۶۳
x(cm)	۰	۱/۹۲۲۶۶	۰
y(cm)	۰	-۱/۶	-۰/۵۹۵۶۴
$W(kg.\frac{cm}{s^2})$	۱۵۱۷۹/۷۵۳۴	۳۹۱۰۲/۱۷۷۳	۴۰۰۹۷/۰۵۸۳
$\frac{W}{W_0}$	۱	۲/۵۷۵۹	۲/۶۴۱۵



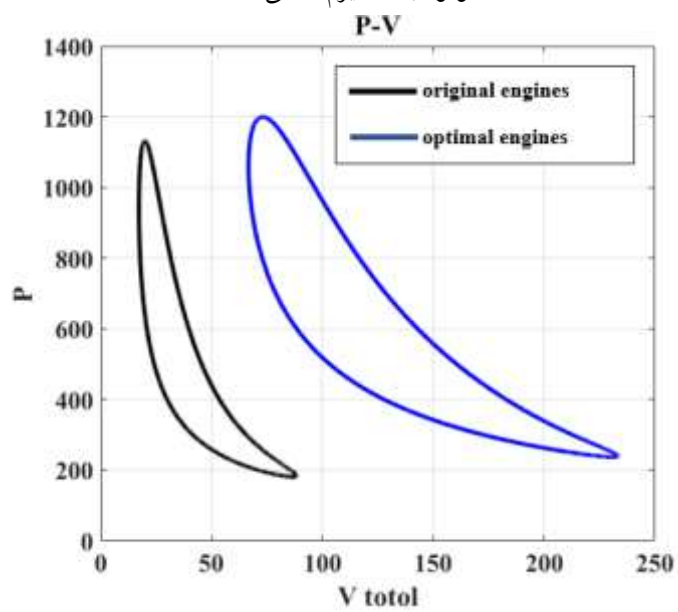
موتور با مکانیزم بهینه.



موتور با مکانیزم اصلی [۴۴].

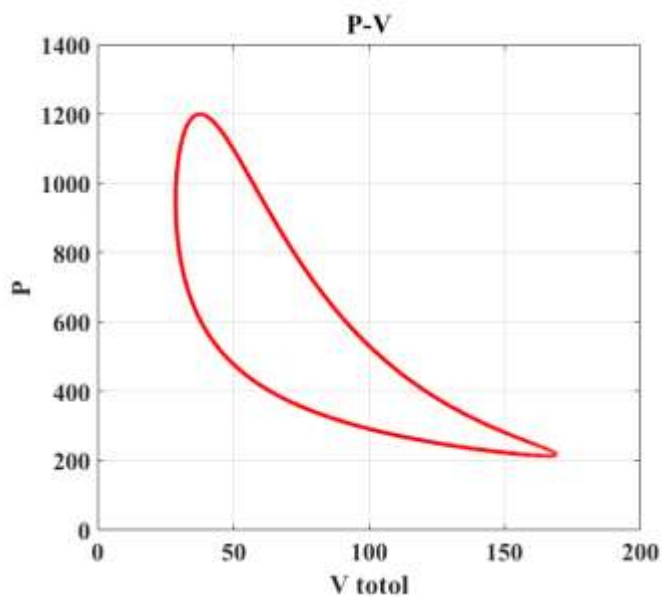


تغییرات تابع هدف.

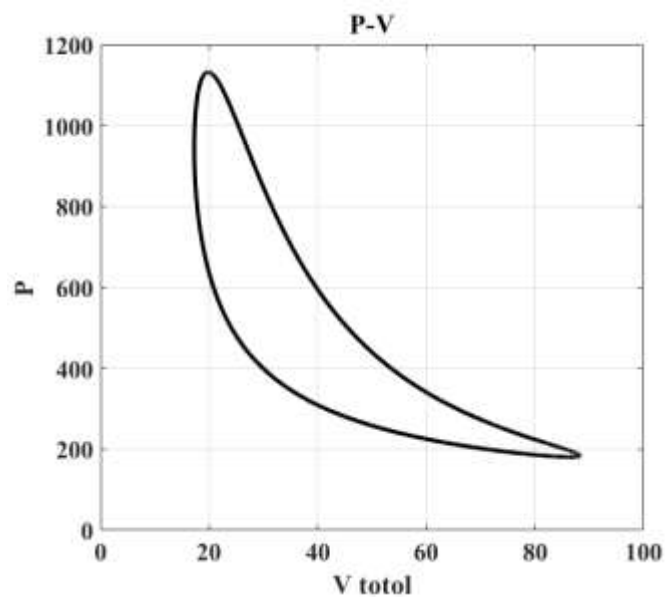


مقایسه مکانیزم اصلی و بهینه.

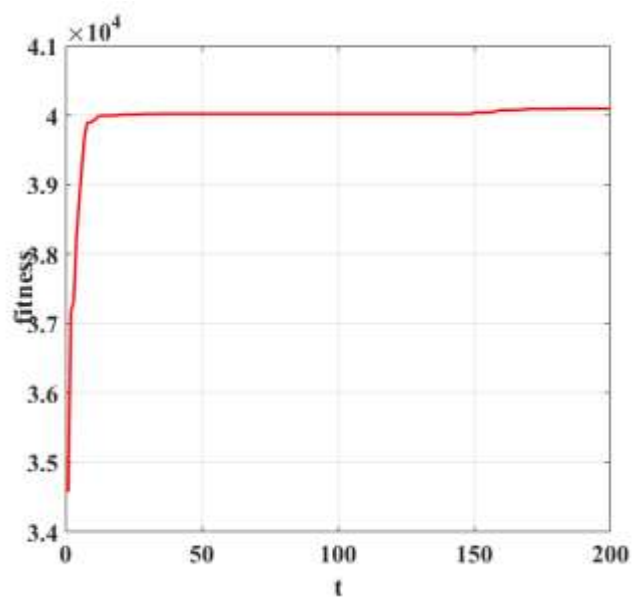
شکل ۴-۵. نتایج بهینه سازی در حالت ۲ با الگوریتم PSO.



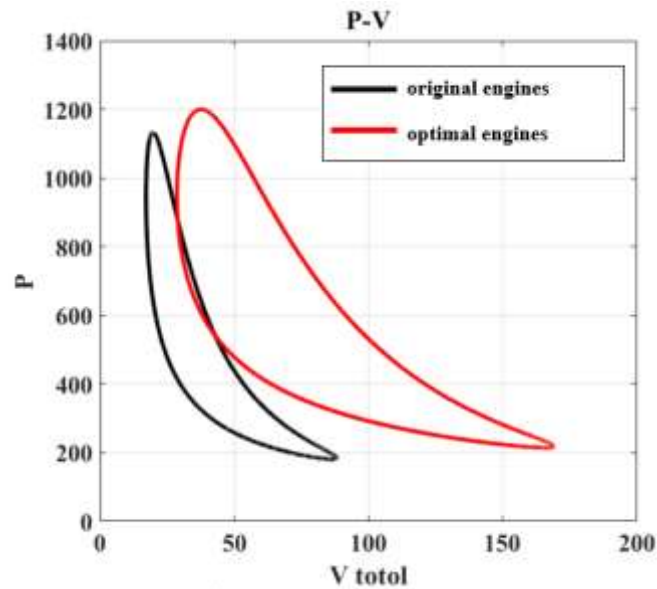
موتور با مکانیزم بهینه.



موتور با مکانیزم اصلی [۴۴].



تغییرات تابع هدف.



مقایسه مکانیزم اصلی و بهینه.

شکل ۴-۶. نتایج بهینه سازی در حالت ۲ با الگوریتم ALO.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش به تحلیل سینماتیکی موتور استرلینگ نوع آلفا براساس مفهوم نسبت تراکم متغیر پرداخته شده است. در فصل یک این پایان نامه به تعریف انواع موتور استرلینگ و نسبت تراکم متغیر پرداخته شد. در فصل دوم مرور مطالعات گذشته که در ارتباط با موضوع پایان نامه بوده انجام شده است. در ادامه و در فصل سوم معادلات حاکم بر مسئله در دو بخش ترمودینامیکی و دینامیکی آورده شده و همچنین به بررسی اثر جابجایی لولای O (مفهوم نسبت تراکم متغیر) بر فشار، حجم و کار خروجی، بر اساس معادلات بدست آمده در این فصل پرداخته شده است. در پایان نیز بهینه سازی سیستم موردنظر در دو حالت مختلف و توسط دو الگوریتم ازدحام ذرات و شیرمورچه انجام شد. بدین صورت که ابتدا تنها متغیرهای جابجایی لولای O یعنی x و y بهینه شده و در حالت بعدی به بهینه سازی تمامی پارامترهای هندسی موتور پرداخته شده است. در ادامه به نتایج بدست آمده از این پایان نامه پرداخته می شود.

- نتایج نشان داد که با حرکت لولا در راستای x و افزایش این مقدار میزان کار خروجی کاهش پیدا می کند. علت این امر کاهش اختلاف فشار مینیمم و ماکزیمم است که نتیجه آن کاهش سطح زیر نمودار $P-V$ می باشد. همچنین با توجه مقادیر حجم بدست آمده نتیجه شد که برای برقراری قید طراحی یعنی مقادیر فشار ماکزیمم و مینیمم باید $1/6 < x < 4$ - در نظر گرفته شود.

- در حالت دوم که حرکت لولا در راستای y انجام می پذیرد مشاهده شد که به علت کاهش فشار ماکزیمم و فشار مینیمم با افزایش y سطح نمودار $P-V$ کاهش پیدا کرده، در نتیجه مقدار کار خروجی کاهش می یابد. همچنین نتیجه شد که با حذف مقادیر منفی فشار و حجم باید $0/8 < y < 4$ - در نظر گرفته شود.

- در حالت سوم نیز فرض شده است که لولای موردنظر بتواند در راستای خطی که در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محورهای مختصات قرار دارد حرکت کند. بدین صورت که مقادیر x و y در این قسمت با هم برابر می‌باشند. نتایج این بخش حاکی از کاهش شدید فشار ماکزیمم با افزایش x و y و کاهش سطح نمودار $P-V$ یعنی کار خروجی می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر فشار و حجم‌های منفی، x و y باید بین $0/6$ - تا 4 طراحی شوند.
- در پایان فرض شده است که قدرمطلق مقادیر x و y با هم برابر، اما دو متغیر دارای علامت-های قرینه باشند. نتایج نشان داد که در قسمت‌های ابتدایی بازه های x و y نسبت به انتهای آنها فشار ماکزیمم بسیار پایین می‌باشد و به یکباره در انتهای بازه x و y کار خروجی افزایش می‌یابد که علت این امر افزایش ناگهانی سطح زیر نمودار $P-V$ است.
- نتایج بخش اول بهینه‌سازی (بهینه‌سازی x و y) نشان داد که کار خروجی بهینه شده توسط الگوریتم شیرمورچه تا حدودی بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از بهتر بودن کار خروجی موتور نسبت تراکم متغیر نسبت به موتور اصلی در حالت نسبت تراکم ثابت با افزایش ۶ درصدی است.
- نتایج قسمت دوم یعنی بهینه‌سازی کل پارامترهای هندسی موتور نیز نشان داد که پارامترهای l_1 و l_2 به کمترین حد خود رسیده‌اند که علت این امر تعریف قید فضای اشغالی موتور می‌باشد. همچنین نتایج در این قسمت نیز حاکی از بهتر بودن الگوریتم شیرمورچه نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات در بدست‌آوردن کار خروجی بوده و در هر دو حالت تقریباً $2/6$ برابر موتور اصلی است.

۵-۲-پیشنهادهات

بررسی سینماتیکی انواع دیگر موتور استرلینگ با استفاده از الگوریتم های PSO و ALO.

استفاده از الگوریتم های فراابتکاری دیگر و نوظهورتر جهت بهینه سازی.

منابع و مآخذ

1. M.H. Ahmadi, H. Hosseinzade, H. Sayyaadi, A.H. Mohammadi, F. Kimiaghdam, 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) 313-322.
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) 561-570.
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) 438-445.
4. G. Walker, *Stirling engines*, (1980).
5. 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.
6. 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) 1365-1387.
7. J. Egas, D.M. Clucas, Stirling engine configuration selection, *Energies*, 11(3) (2018) 584.
۸. آتشکاری، کاظم، نادر نریمان زاده، آزاد اردشیری، ابوالفضل خلخالی، علی جمالی. ۱۳۸۵ "طراحی ژنتیکی شبکه های عصبی GMDH برای مدلسازی گشتاور خروجی یک موتور با نسبت تراکم متغیر"، چهاردهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان.
9. Nilsson, Ylva. 2007. Modelling for Fuel Optimal Control of a Variable Compression Engine. Master thesis, Linköping Studies in Science and Technology.
10. Mendler, Charles. 2011. ENVERA VARIABLE COMPRESSION RATIO ENGINE. technical report, US Department of Energy Cooperative Agreement Instrument Number.
۱۱. ویلارد، پاک رابک. ۱۹۹۷. مبانی مهندسی موتورهای احتراق داخلی. ترجمه دکتر سپهر صنایع. ۱۳۸۴. انتشارات دانشگاه علم صنعت ایران
12. Bergström, A. 2003. Torque Modeling and Control of a Variable Compression Engine. Master's thesis., Reg nr:LiTH-ISY-EX-3421-2003.
13. G. Walker, *Stirling engines*, (1980).
14. T. Finkelstein, *Air engines: the history, science, and reality of the perfect engine/Theodor Finkelstein*, Allan J, Organ, (2001).

15. G. Schmidt, The theory of Lehmann's calorimetric machine, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, 15(1) (1871) 98-112.
16. Urieli, D.M. Berchowitz, Stirling cycle engine analysis, A. Hilger Bristol, UK, 1984.
17. C.D. West. Principles and applications of Stirling engines. Van Nostrand Reinhold, 1986.
18. J.R. Senft. Ringbom stirling engines. Oxford University Press, 1993.
19. B. Kongtragool, S. Wongwises. Investigation on power output of the gamma configuration low temperature differential Stirling engines. *Renewable Energy*, 30, 2005, p.465-476.
20. J.I. Prieto, J. Fano, C. González, M.A. González, R. Diaz. Preliminary design of the kinematic Stirling engine using dynamic similarity and quasi-static simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 211, 1997, p.229-238.
21. J.I. Prieto, A.B. Stefanovskiy. Dimensional analysis of leakage and mechanical power losses of kinematic Stirling engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217, 2003, p.917-934.
22. J.I. Prieto, M.A. González, C. González, J. Fano. A new equation representing the performance of kinematic Stirling engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 214, 2000, p.449-464.
23. J. Prieto, D. Garcia. Comparison between Kolin's cube law for power and other criteria for preliminary design of kinematic Stirling engines. *Proceeding of 12th international Stirling engine conference*, Durham UK, 2005, pp. 389-397.
24. N. Parlak, A. Wagner, M. Elsner, H.S. Soyhan. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in non-ideal adiabatic conditions. *Renewable Energy*, 34 (2009):266-273.
25. I. Tlili, Y. Timoumi, S.B. Nasrallah. Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application. *Renewable Energy*, 33, 2008, p.1911-1921.
26. S. Schulz, F. Schwendig. A General Simulation Model for Stirling Cycles. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 118, 1996, p.1-7.
27. K.K. Makhkamov, D.B. Ingham. Analysis of the Working Process and Mechanical Losses in a Stirling Engine for a Solar Power Unit. *Journal of Solar Energy Engineering*, 121, 1999, p.121-127.
28. H. Karabulut, H.S. Yücesu, C. Çinar. Nodal analysis of a Stirling engine with concentric piston and displacer. *Renewable Energy*, 31, 2006, p.2188-2197.
29. A. Robson, T. Grassie, J. Kubie. Modelling of a low-temperature differential Stirling engine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 221 (2007):927-943.

30. M. Hooshang, R. Askari Moghadam, S. AlizadehNia, Dynamic response simulation and experiment for gamma-type Stirling engine, *Renewable Energy* 86 (2016) 192-205.
31. Chin-Hsiang Cheng, Ying-Ju Yu, Combining dynamic and thermodynamic models for dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism, *Renewable Energy* 37 (2012) 161-173.
32. L.S. Scollo, P.E. Valdez, S.R. Santamarina, M.R. Chini, J.H. Baro'n, Twin cylinder alpha stirling engine combined model and prototype redesign, 2013.
33. M. Afzali Ashkezari, Dynamic analysis of a v-type slider-crank mechanism in Stirling engine, Tarbiat Modares University, Iran, 2014(in Persian).
34. Somayeh Toghyani, Alibakhsh Kasaeian, Seyyed Hasan Hashemabadi, Morteza Salimi, Multi-objective optimization of GPU3 Stirling engine using third order analysis, *Energy Conversion and Management* 87 (2014) 521-529.
35. Chen Duan, Xinggang Wang, Shuiming Shu, Changwei Jing, Huawei Chang, Thermodynamic design of Stirling engine using multi-objective particle swarm optimization algorithm, *Energy Conversion and Management* 84 (2014) 88-96.
36. Gang Xiao, Umair Sultan, Mingjiang Ni, Hao Peng, Xin Zhou, Shulin Wang, Zhongyang Luo, Design optimization with computational fluid dynamic analysis of β -type Stirling engine, 2016.
37. Mohammad H. Ahmadi, Hadi Hosseinzade, Hoseyn Sayyaadi, Amir H. Mohammadi, Farshad Kimiaghdam, 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) 313-322.
38. Ahmad K. Almajri, Saad Mahmoud, Raya Al-Dadah, Modelling and parametric study of an efficient Alpha type Stirling engine performance based on 3D CFD analysis, *Energy Conversion and Management* 145 (2017) 93-106.
39. Murat Altin, Melih Okur, Duygu Ipci, Serdar Halis, Halit Karabulut, Thermodynamic And Dynamic Analysis Of An Alpha Type Stirling Engine With Scotch Yoke Mechanism, 2018.
40. Chin-Hsiang Cheng, Ying-Ju Yu, Dynamic simulation of a beta-type Stirling engine with cam-drive mechanism via the combination of the thermodynamic and dynamic models, *Renewable Energy* 36 (2011) 714-725.
41. Guozhong Ding, Wenming Chen, Tianyi Zheng, Yongzhen Li, Yakun Ji, Volume ratio optimization of Stirling engine by using an enhanced model, 2018.
42. D.J. Shendage, S.B. Kedare, S.L. Bapat, An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism, *Renewable Energy* 36 (2011) 289-297.

۴۳. شهاب غلامی، محمدرضا الهامی، عباس وفایی صفت، آنالیز دینامیکی موتور استرلینگ دوسیلندر خورجینی خورشیدی نوع آلفا، نخستین همایش منطقه ای مهندسی مکانیک ۱۳۸۹.

44. A. Rahmati, S.M. Varedi-Koulaei, M.H. Ahmadi, H. Ahmadi, Dimensional synthesis of the Stirling engine based on optimizing the output work by evolutionary algorithms, Energy Reports 6 (2020) 1468–1486.

۴۵. آرش کاظمی، مسعود ایرانمنش، طراحی و شبیه سازی موتور استرلینگ آلفا، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-انرژی های تجدید پذیر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ۱۳۹۵.

Abstract

In this study, focusing on the Alpha-type Stirling Engine, the variable compression ratio mode is designed. The design variables of the problem are determined according to the geometry of the engine and how to change its structure, and to solve the optimization problem, the PSO and ALO algorithm are used and their results are compared with each other. Matlab software has also been used to write the program of two algorithms. The results of this research consist of two parts, so that initially the only design variables are the displacement of the hinge o in the direction of x and y (the concept of variable Compression ratio) and using the two optimization algorithms mentioned, the optimal output work is obtained. In the second part of the studies of this research, all the geometric parameters of the engine are optimized. The results of this study indicate that the output of the engine is higher than the main engine in the ratio of constant Compression ratio. Thus, the output work in this case increases by approximately 0.06%. It was also observed that the output work optimized by the ALO algorithm is somewhat better than the PSO algorithm. In the end, the results showed that in the case of optimizing all the geometric parameters of the motor, including moving the hinge o in the direction of x and y, the output work is approximately 2.5 times the work of the main motor.

Keywords: Optimization, Alpha Stirling Engine, antlion optimization algorithm, Particle Swarm optimization algorithm, Variable Compression Ratio.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Mechatronics Engineering

Kinematic Analysis of the Alpha-type Stirling Engine Based on the Concept of Variable Compression Ratio Engine

By: M. Farokhinia

Supervisor:

Dr. S.M. Varedi_Koulai

Supervisor:

Dr. M.H. Ahmadi

October, 2021