

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی سیستم‌های انرژی

---

# طراحی مفهومی و بهینه‌سازی سیکل هیبریدی موتور استرلینگ

---

نگارنده

هادی حسین‌زاده حلقه‌سری

استاد راهنما

دکتر حسین صیادی

شهریور ۱۳۹۱



تقدیم به پدری دلسوز

مادری مهربان

و برادری فداکار

## تاییدیه‌ی هیات داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

هیات داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان **طراحی مفهومی و بهینه‌سازی سیکل هیبریدی موتور استرلینگ توسط آقای هادی حسین‌زاده حلقه‌سری صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی مورد تایید قرار می‌دهند.**

- |      |                   |                   |
|------|-------------------|-------------------|
| امضا | دکتر حسین صیادی   | ۱ - استاد راهنما: |
| امضا | دکتر مجید عمیدپور | ۲ - استاد ممتحن:  |
| امضا | دکتر فرشاد ترابی  | ۳ - استاد ممتحن:  |

## تاییدیه صحت و اصالت نتایج

اینجانب هادی حسین زاده حلقه سری به شماره دانشجویی ۸۹۰۳۰۸۴ دانشجوی رشته سیستم های انرژی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تایید می نمایم که کلیه نتایج این پایان نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مولفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی و ...) با اینجانب رفتار خواهد شد. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذیصلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

## حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسندگان آن می باشد. بهره برداری از این پایان نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می گردد، بلامانع است:

- بهره برداری از این پایان نامه برای همگان و با ذکر منبع، بلامانع است.
- بهره برداری از این پایان نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما و با ذکر منبع، بلامانع است.
- بهره برداری از این پایان نامه تا تاریخ \_\_\_\_\_ ممنوع است.

نام استاد راهنما:

تاریخ:

امضا:

# قدردانی

پایان نامه حاضر با کمک های بی دریغ و صمیمانه استاد گرانقدر دکتر حسین صیادی و دوست عزیز محمدحسین احمدی آماده و در اختیار کتابخانه به منظور توسعه علم و تکنولوژی موتورهای استرلینگ قرار داده شده است؛ امید است که مفید فایده قرار گیرد.

لازم به ذکر است که پایان نامه حاضر با استفاده از نرم افزار متن باز XqPersian، حروف چینی و صفحه آرایی گردیده است. در اینجا لازم است از زحمات بی دریغ دکتر فرشاد ترابی در آموزش و ترویج استفاده از این نرم افزار تشکر و قدردانی صورت گیرد.

با سپاس فراوان از دوستانی که در طول این دوره بیادمانندی مرا همراهی کردند و بردن نامشان در اینجا تنها گوشه کوچکی از زحماتشان را جبران خواهد نمود؛ پویا نوید، حمید نصیر، نیره نیرومند، هومن گلچوبیان، جواد نوروزپور، امیرحسین صحرائیان، سعید دهقانی.

# چکیده

موتور استرلینگ به عنوان یک موتور احتراق خارجی، با راندمان نزدیک به راندمان کارنو، گزینه مناسبی جهت استفاده در سیستم‌های تولید توان با توزیع پراکنده می‌باشد. در این مطالعه ابتدا تحلیل‌های ترمودینامیکی مختلفی روی موتور استرلینگ انجام گرفته و سپس تاثیرات دمای منبع گرم، حجم محفظه انبساط، سرعت دورانی موتور، فشار متوسط سیکل و اختلاف فاز پیستون‌ها بررسی می‌گردد. با استفاده از روش شبکه عصبی، بهینه‌سازی چند هدفه با روش ژنتیک الگوریتم به منظور افزایش توان و راندمان و کاهش وزن و قیمت روی یک موتور پایه انجام شده و نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دمای منبع گرم و فشار متوسط سیکل، توان و راندمان افزایش می‌یابند. به دلیل افت فشار در مبدل‌ها، توان نسبت به سرعت موتور دارای نقطه حداکثری و راندمان با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. با استفاده از آنالیز ابعادی روابط جدیدی برای تحلیل موتور به روش آدیاباتیک به دست آمده که مطابقت خوبی با روش عددی دارد. پیل سوختی اکسید جامد، با خروجی گازهای حاصل از فرآیند الکتروشیمیایی درون پیل با دمای بالا، به عنوان سیستم بالادستی سیستم هیبریدی، حرارت مورد نیاز برای به حرکت درآوردن موتور استرلینگ را تامین می‌نماید. نتایج خروجی نشان دهنده افزایش توان خروجی و راندمان سیستم هیبریدی نسبت به سیستم‌های مستقل پیل سوختی یا موتور استرلینگ می‌باشند. تحلیل چند هدفه روس سیستم هیبریدی نشان داد که با افزایش دمای کارکرد پیل سوختی به اندازه  $100^{\circ}\text{C}$ ، توان تا  $18/3\%$  افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، ژنتیک الگوریتم، شبکه عصبی، موتور استرلینگ، SOFC



# فهرست مطالب

|    |   |
|----|---|
| ز  | فهرست جداول                                     |
| ض  | فهرست تصاویر                                    |
| ۱  | ۱ مقدمه   |
| ۵  | ۱.۱ تاریخچه                                     |
| ۵  | ۱.۱.۱ استرلینگ                                  |
| ۸  | ۱.۱.۲ پیل سوختی                                 |
| ۱۰ | ۱.۱.۳ سیستم هیبریدی                             |
| ۱۲ | ۱.۲ اهداف پایان نامه                            |
| ۱۳ | ۱.۳ درباره پایان نامه                           |
| ۱۵ | ۲ موتور استرلینگ و پیل سوختی SOFC               |
| ۱۵ | ۲.۱ موتور استرلینگ                              |
| ۱۶ | ۲.۱.۱ تاریخچه                                   |
| ۱۷ | ۲.۱.۲ ساختار و مکانیزم‌های مختلف موتور استرلینگ |
| ۲۳ | ۲.۱.۳ پارامترهای موثر بر عملکرد موتور           |
| ۲۵ | ۲.۲ پیل سوختی اکسید جامد                        |

|    |   |       |
|----|---|-------|
| ۲۶ | اجزا اصلی SOFC  | ۲.۲.۱ |
| ۲۷ | هندسه پیل سوختی SOFC  | ۲.۲.۲ |
| ۲۸ | طرح مسأله   | ۲.۳   |
| ۲۸ | موتور ۳-GPU   | ۲.۳.۱ |
| ۳۰ | پیل سوختی اکسید جامد ۲۵ کیلوواتی                              | ۲.۳.۲ |
| ۳۱ | سیستم هیبریدی موتور ۳-GPU و SOFC                              | ۲.۳.۳ |
| ۳۴ | <b>۳ تحلیل سیستم‌های مورد بررسی</b>                           |       |
| ۳۴ | موتور استرلینگ  | ۳.۱   |
| ۳۴ | تحلیل ترمودینامیکی سیکل استرلینگ                              | ۳.۱.۱ |
| ۳۶ | تحلیل هم‌دما  | ۳.۱.۲ |
| ۳۹ | تحلیل اشمیت   | ۳.۱.۳ |
| ۴۳ | تحلیل آدیاباتیک   | ۳.۱.۴ |
| ۵۲ | تحلیل پلی‌تروپیک  | ۳.۱.۵ |
| ۵۶ | تحلیل اقتصادی و وزن موتور استرلینگ                            | ۳.۱.۶ |
| ۶۰ | پیل سوختی SOFC  | ۳.۲   |
| ۶۰ | تحلیل الکتروشیمیایی پیل سوختی SOFC                            | ۳.۲.۱ |
| ۷۰ | سیستم هیبریدی   | ۳.۳   |
| ۷۰ | مدلسازی سیستم هیبریدی   | ۳.۳.۱ |
| ۷۴ | <b>۴ نتایج</b>  |       |
| ۷۴ | تحلیل موتور ۳-GPU   | ۴.۱   |
| ۷۵ | آدیاباتیک   | ۴.۱.۱ |
| ۷۹ | آنالیز حساسیت بر موتور استرلینگ با استفاده از تحلیل آدیاباتیک | ۴.۱.۲ |
| ۸۲ | پلی‌تروپیک  | ۴.۱.۳ |

|     |       |                                    |
|-----|-------|------------------------------------|
| ۸۳  | ۴.۱.۴ | آنالیز ابعادی                      |
| ۹۰  | ۴.۱.۵ | بهینه‌سازی چند هدفه موتور استرلینگ |
| ۹۹  | ۴.۲   | تحلیل پیل سوختی SOFC ۲۵ کیلوواتی   |
| ۹۹  | ۴.۲.۱ | آنالیز حساسیت پیل سوختی            |
| ۱۰۷ | ۴.۲.۲ | بهینه‌سازی چند هدفه پیل سوختی SOFC |
| ۱۱۰ | ۴.۳   | تحلیل سیستم هیبریدی                |
| ۱۱۰ | ۴.۳.۱ | نتایج تحلیل سیستم هیبریدی          |
| ۱۱۱ | ۴.۳.۲ | بهینه‌سازی چند هدفه سیستم هیبریدی  |
| ۱۱۸ | ۵     | جمع بندی و نتیجه‌گیری              |
| ۱۲۱ |       | فهرست علائم و اختصارات             |
| ۱۲۳ |       | منابع و مراجع                      |

# فهرست جداول

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| ۱۰  | شرایط عملکرد پیل های سوختی مختلف                       | ۱.۱ |
| ۳۰  | مشخصات موتور ۳-GPU                                     | ۲.۱ |
| ۳۲  | مشخصات پیل سوختی ۲۵ کیلووات                            | ۲.۲ |
| ۴۹  | معادلات حاکم بر تحلیل آدیاباتیکی                       | ۳.۱ |
| ۵۸  | جدول قیمت موتور برای توان تا ۱۰ کیلووات [۹]            | ۳.۲ |
| ۶۰  | جدول وزن موتور برای توان تا ۷ کیلووات [۹]              | ۳.۳ |
| ۶۶  | ثابت های پلاریزاسیون فعالسازی                          | ۳.۴ |
| ۶۷  | ثابت های مقاومت الکتریکی                               | ۳.۵ |
| ۶۸  | نرخ مولی عناصر مختلف در پیل سوختی                      | ۳.۶ |
| ۷۵  | تحلیل ترمودینامیکی موتور ۳-GPU                         | ۴.۱ |
| ۸۵  | پارامترهای موثر در آنالیز ابعادی برای تحلیل آدیاباتیکی | ۴.۲ |
| ۹۰  | ضرایب رابطه (۴.۶) توان موتورهای نوع بتا و گاما         | ۴.۳ |
| ۱۰۱ | مقایسه نتایج بهینه سازی چند هدفه موتور با روش Fuzzy    | ۴.۴ |
| ۱۰۷ | مقایسه نتایج بهینه سازی چند هدفه موتور با روش LINMAP   | ۴.۵ |
| ۱۰۸ | مقایسه نتایج بهینه سازی چند هدفه موتور با روش TOPSIS   | ۴.۶ |
| ۱۰۸ | مقایسه نتایج مدل و مقادیر واقعی پیل سوختی              | ۴.۷ |

- 
- ۴.۸ نتایج نهایی بهینه‌سازی چند هدفه پیل سوختی . . . . . ۱۰۹
- ۴.۹ نتایج سیستم هیبریدی . . . . . ۱۱۱
- ۴.۱۰ مقایسه سیستم هیبریدی و سیستم‌های مستقل . . . . . ۱۱۲
- ۴.۱۱ نتایج نهایی بهینه‌سازی چند هدفه سیستم هیبریدی . . . . . ۱۱۶

# فهرست تصاویر

|    |  |     |
|----|--|-----|
| ۲  | سیکل ترمودینامیکی موتورهای حرارتی                          | ۱.۱ |
| ۴  | نمودارهای فشار-حجم و دما-انتروبی سیکل استرلینگ             | ۱.۲ |
| ۱۷ | اولین موتور ساخته شده توسط رابرت استرلینگ                  | ۲.۱ |
| ۱۹ | انواع موتور استرلینگ تک و دو زمانه                         | ۲.۲ |
| ۲۰ | انواع موتور استرلینگ (آلفا، بتا و گاما)                    | ۲.۳ |
| ۲۲ | انواع موتور استرلینگ از لحاظ اتصال پیستون                  | ۲.۴ |
| ۲۳ | موتور استرلینگ پیستون آزاد و سیالی                         | ۲.۵ |
| ۲۸ | انواع پیل سوختی اکسید جامد                                 | ۲.۶ |
| ۳۱ | پیل سوختی ۲۵ کیلووات پایه                                  | ۲.۷ |
| ۳۴ | سیکل کارنو و استرلینگ                                      | ۳.۱ |
| ۳۵ | جابجایی پیستون‌ها در طول سیکل                              | ۳.۲ |
| ۳۵ | جابجایی سینوسی پیستون‌ها در مقایسه با حالت واقعی           | ۳.۳ |
| ۳۶ | سیکل فشار-حجم استرلینگ با احتساب بازیاب                    | ۳.۴ |
| ۴۰ | شماتیک شکل موتور استرلینگ در آنالیز اشمیت                  | ۳.۵ |
| ۴۴ | نمودار توزیع دما در موتور در تحلیل آدیاباتیک سیکل استرلینگ | ۳.۶ |
| ۴۵ | نمونه حجم کنترل مورد بررسی در تحلیل آدیاباتیک              | ۳.۷ |

|    |  |
|----|--|
| ۴۸ | فلوچارت تحلیل عددی آدیاباتیک                                     |
| ۵۰ | نمودار توزیع انرژی در سه محفظه با تحلیل آدیاباتیک                |
| ۵۳ | فلوچارت تحلیل آدیاباتیک به همراه تحلیل ساده                      |
| ۵۴ | نمودار سیکل استرلینگ با بازیاب در تحلیل پلی تروپیک               |
| ۵۵ | شکل شماتیک موتور گاما مورد بررسی در تحلیل پلی تروپیک             |
| ۵۹ | قیمت موتور استرلینگ بر حسب واحد توان                             |
| ۵۹ | قیمت موتور استرلینگ  |
| ۶۱ | وزن موتور استرلینگ   |
| ۶۲ | عملکرد پیل سوختی   |
| ۶۴ | تاثیرات دمای کارکرد پیل سوختی بر ولتاژ خروجی                     |
| ۶۸ | افت‌های پتانسیل و نمودار پلاریزاسیون حاصل                        |
| ۶۹ | نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی و چگالی توان                        |
| ۷۳ | شکل شماتیک سیستم هیبریدی پیل سوختی و موتور استرلینگ              |
| ۷۶ | تغییرات حجم موتور ۳-GPU بر حسب زاویه دروان میل‌لنگ               |
| ۷۶ | تغییرات فشار موتور ۳-GPU بر حسب زاویه دروان میل‌لنگ              |
| ۷۷ | تغییرات فشار بر حسب تغییرات حجم موتور                            |
| ۷۸ | تغییرات دمایی محفظه‌ها تراکم و انبساط بر حسب زاویه دروان میل‌لنگ |
| ۷۸ | تغییرات انرژی بر حسب زاویه دروان میل‌لنگ                         |
| ۷۹ | تغییرات جرم گاز درون محفظه‌ها بر حسب زاویه دروان میل‌لنگ         |
| ۸۰ | مقایسه تحلیل آدیاباتیک و هم‌دما برای موتور ۳-GPU                 |
| ۸۱ | بررسی رفتار توان و راندمان بر حسب اختلاف فاز                     |
| ۸۱ | بررسی رفتار توان و راندمان بر حسب $k_p$                          |
| ۸۲ | بررسی رفتار توان و راندمان بر حسب دمای منبع گرم                  |

- ۴.۱۱ بررسی رفتار توان و راندمان بر حسب دور موتور . . . . . ۸۳
- ۴.۱۲ نتایج تحلیل پلی تروپیک . . . . . ۸۴
- ۴.۱۳ تغییرات کار ویژه بر حسب نسبت حجم مرده  $K$  برای چند نسبت دمایی مختلف ۸۵
- ۴.۱۴ نتایج اولیه به همراه Curvefit برای  $0.2 < \tau < 0.3$  . . . . . ۸۷
- ۴.۱۵ نتایج اولیه به همراه Curvefit برای  $0.3 < \tau < 0.4$  . . . . . ۸۷
- ۴.۱۶ نتایج اولیه به همراه Curvefit برای  $0.4 < \tau < 0.5$  . . . . . ۸۸
- ۴.۱۷ نتایج اولیه به همراه Curvefit برای  $0.5 < \tau < 0.6$  . . . . . ۸۹
- ۴.۱۸ نتایج اولیه به همراه Curvefit برای  $0.6 < \tau < 0.7$  . . . . . ۸۹
- ۴.۱۹ مقایسه روابط جدید با حل عددی در تحلیل آدیباتیک . . . . . ۹۱
- ۴.۲۰ نمایش شماتیک از نرون یک شبکه عصبی به همراه ورودی و خروجی های آن . ۹۲
- ۴.۲۱ توابع انتقال خطی و غیر خطی یک نرون . . . . . ۹۲
- ۴.۲۲ شبکه تغذیه مستقیم . . . . . ۹۳
- ۴.۲۳ پرسپترون تک لایه ای و چند لایه ای . . . . . ۹۳
- ۴.۲۴ جبهه PARETO توان و راندمان موتور استرلینگ ۳-GPU . . . . . ۹۹
- ۴.۲۵ جبهه PARETO توان و قیمت موتور استرلینگ ۳-GPU . . . . . ۱۰۰
- ۴.۲۶ جبهه PARETO توان و وزن موتور استرلینگ ۳-GPU . . . . . ۱۰۰
- ۴.۲۷ نمودار پلاریزاسیون و چگالی توان . . . . . ۱۰۲
- ۴.۲۸ نمودار تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات دمای کاری پیل سوختی . . . . . ۱۰۲
- ۴.۲۹ نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی در فشارهای مختلف . . . . . ۱۰۳
- ۴.۳۰ نمودار توان پیل سوختی در فشارهای مختلف . . . . . ۱۰۳
- ۴.۳۱ نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی در دماهای مختلف . . . . . ۱۰۴
- ۴.۳۲ نمودار توان پیل سوختی در دماهای مختلف . . . . . ۱۰۴
- ۴.۳۳ نمودار توان پیل سوختی در چگالی جریان های حدی مختلف . . . . . ۱۰۵
- ۴.۳۴ نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی در چگالی جریان های حدی مختلف . . . . . ۱۰۵



- ۴.۳۵ نمودار توان بر حسب ولتاژ پیل سوختی در دماهای مختلف . . . . . ۱۰۶
- ۴.۳۶ نمودار میزان مصرف سوخت بر حسب ولتاژ پیل سوختی در دماهای مختلف . . ۱۰۶
- ۴.۳۷ جبهه PARETO توان و راندمان پیل سوختی . . . . . ۱۰۹
- ۴.۳۸ نمودار پلاریزاسیون و چگالی توان پیل سوختی مورد استفاده در سیستم هیبریدی ۱۱۲
- ۴.۳۹ حساسیت توان، راندمان و مصرف سوخت به ولتاژ کاری پیل سوختی . . . . . ۱۱۳
- ۴.۴۰ حساسیت توان، راندمان و مصرف سوخت به دمای کاری پیل سوختی . . . . . ۱۱۴
- ۴.۴۱ حساسیت توان، راندمان و مصرف سوخت به  $U_f$  پیل سوختی . . . . . ۱۱۵
- ۴.۴۲ جبهه PARETO توان و راندمان سیستم هیبریدی . . . . . ۱۱۶

# فصل ۱

## مقدمه

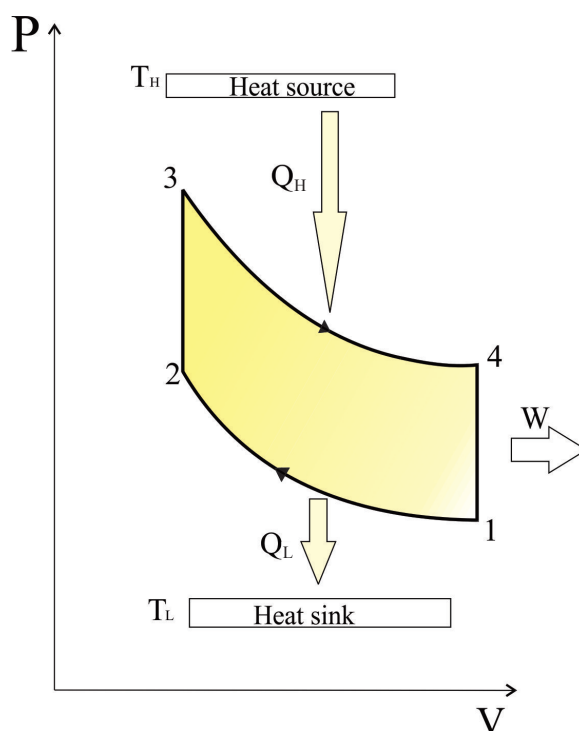
آینده متعلق به کسانی است که بتوانند به حل دو موضوع مهم جهان کمک کنند، انرژی و آب.

### ران پرنیک<sup>۱</sup>

رشد روز افزون مصرف سوخت‌های فسیلی، با توجه به محدود بودن این ذخایر انرژی در جهان، همچنین تأثیرات زیست محیطی و گرم شدن کره زمین در اثر استفاده فراوان از این سوخت‌ها باعث شده در سالیان اخیر توجه ویژه‌ای در حوزه انرژی صورت پذیرد. بسیاری از محققان و دانشمندان تمرکز خود را به بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، بادی و اقیانوسی، جایگزینی سوخت‌های هیدروژنی و استفاده از سوخت‌های زیستی و انرژی زمین گرمایی و بسیاری از روش‌های جدید و پاک برای تامین انرژی مورد نیاز معطوف نموده‌اند. کاهش و بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش‌های پرمصرف مانند خانگی، حمل‌ونقل، صنعت و کشاورزی از دیگر اقدامات کشورهای جهان به منظور مقابله با افزایش آلاینده‌گی و گرم شدن بیش از حد کره زمین است. همچنین هماهنگی بین محافظت از محیط زیست و رشد اقتصادی یکی دیگر از مسائل مورد توجه در سطح جهانی است. کاهش هزینه‌های تولید انرژی پاک و در دسترس بودن آن از مهمترین مواردی است که در بررسی عوامل فوق باید

---

<sup>۱</sup>Ron Pernick



شکل ۱.۱: سیکل ترمودینامیکی موتورهای حرارتی

در نظر گرفته شوند. به دلیل بالا بودن قیمت انرژی الکتریکی در کشورها در سالهای گذشته، سیستم‌های توزیع پراکنده به عنوان یکی از راه‌حل‌های امکان‌پذیر و مطلوب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۱، ۲، ۳، ۴]. در سیستم‌های توزیع پراکنده، به‌جای استفاده از نیروگاه‌های بزرگ برای تولید الکتریسیته و انتقال آن به مصرف‌کننده نهایی، از سیستم‌های تولید توان با ظرفیت‌های کوچک‌تر ولی نزدیک به مصرف‌کننده، استفاده می‌گردد. به این شکل سیستم‌های انتقال که دارای افت انرژی زیادی هستند از سیستم توزیع حذف می‌گردند.

یکی از تجهیزاتی که برای استفاده در سیستم‌های توزیع پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرد، موتور حرارتی است. موتورهای حرارتی برای تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتورهای حرارتی بین دو منبع گرم و سرد کار می‌کنند که شکل شماتیک آن در شکل ۱.۱ نشان داده شده است.

کار اندیکه انجام شده توسط موتور طبق قانون اول ترمودینامیک، اختلاف بین حرارت دریافتی از منبع گرم و حرارت انتقالی به منبع سرد می‌باشد ( $Q_H - Q_L = W$ ). همچنین راندمان حرارتی

سیکل، حاصل تقسیم کار خروجی بر حرارت دریافتی از منبع گرم است  $\left(\eta_{thermal} = \frac{W}{Q_H}\right)$  [۵]. طبق رابطه کارنو<sup>۱</sup> حداکثر راندمان خروجی از موتور حرارتی به شکل زیر تعریف خواهد شد:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1.1)$$

که در آن  $T_H$  دمای منبع گرم و  $T_L$  دمای منبع سرد می‌باشند. اما به دلیل افت‌های حرارتی و مکانیکی و محدود بودن نرخ انتقال حرارت بین سیال عامل و منابع گرم و سرد و ...، رسیدن به راندمان ایده‌آل کارنو امری ناممکن است. بنابراین برای موتورهای حرارتی راندمان دیگری تعریف می‌گردد که توسط کرزن و اهل‌بورن<sup>۲</sup> ارائه گردید [۶]:

$$\eta_{Curzon-Ahlborn} = 1 - \sqrt{\frac{T_L}{T_H}} \quad (1.2)$$

این راندمان متناظر با بیشترین توان خروجی ممکن برای موتورهای حرارتی با توجه به افت‌های مکانیکی و بازگشت‌ناپذیری‌هاست. اما از بین موتورهای حرارتی شناخته شده، موتور استرلینگ<sup>۳</sup>، بالاترین راندمان تئوری و نزدیک به راندمان کارنو را دارا می‌باشد. موتور استرلینگ مانند سایر موتورهای حرارتی بین دو منبع گرم و سرد کار می‌کند، با این تفاوت که انتقال حرارت از منبع گرم به سیال عامل<sup>۴</sup> و از سیال عامل به منبع سرد در دماهای ثابتی اتفاق می‌افتند (شکل ۱.۲). از این رو سیکل ترمودینامیکی آن بسیار شبیه سیکل کارنو می‌باشد. موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی است، بنابراین می‌توان از آن برای استفاده از منابع مختلف حرارتی و حتی حرارت بازیافتی<sup>۵</sup> بهره برد [۷]. موتور استرلینگ دارای مزیت‌های متعددی در مقایسه با سایر موتورهای احتراق داخلی است؛ راندمان متداول برای موتور استرلینگ در حدود ۴۰٪ می‌باشد. این موضوع

<sup>۱</sup> Carnot

<sup>۲</sup> Curzon-Ahlborn

<sup>۳</sup> Stirling engine

<sup>۴</sup> Working fluid

<sup>۵</sup> Waste heat