



Sensitivity analysis for objectives of power, efficiency, heat loss, and working fluid cost based on input parameters in the Stirling engine

Bahram Vaziri¹, Mohammad Azadi^{1*}, Mojtaba Biglari¹, Seyed Navid Madani²

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

² Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Stirling Engine
Sensitivity Analysis
Power
Efficiency
Heat Loss
Working Fluid Cost

ABSTRACT

The Stirling engine is a combustion engine that converts mechanical work into electricity. Stirling engine needs a working fluid to work and usually, air, helium, hydrogen, nitrogen, etc. are used. Among the mentioned operating fluids, only air is free, but unfortunately, it has lower power and efficiency compared to other working fluids. It is expected that the desired power and efficiency can be obtained at a lower cost by combining two working fluids such as air and helium. However, to check this issue, it is needed to analyze the sensitivity of different input parameters on the outputs. Therefore, in this study, the non-ideal thermodynamic model was investigated, and the results of the presented model were validated by experiments, and then with the help of Design Expert software, 1260 designs were considered. Finally, the effect of changes in input parameters such as the speed, gas injection pressure, temperature, and helium percentage on outputs such as power, efficiency, heat loss, and cost were investigated. It was found that the cost was only a function of the gas injection pressure and the percentage of the fluid composition. Moreover, the results showed that with the increase of the temperature, pressure, speed, and percentage of helium, the power increased by 189%, 178%, 82%, and 54%, respectively. With increasing the temperature, speed, and pressure, efficiency increased by 42%, decreased by 23%, and decreased by 17%, respectively. With the increase in the temperature, speed, and pressure, the heat loss increased by 85%, 71%, and 357%, respectively.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: m_azadi@semnan.ac.ir (M. Azadi)

Received 11 July 2023; Accepted 6 December 2023

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Vaziri B, Azadi M, Biglari M, Madani SN. Sensitivity analysis for objectives of power, efficiency, heat loss, and working fluid cost based on input parameters in the Stirling engine. *Engine Research*. 2023 June 22;70(2):1-21. doi: 10.22034/ER.2023.2006618.1008

تحلیل حساسیت برای توابع هدف توان، بازده، اتلاف حرارتی و هزینه سیال عامل بر مبنای متغیرهای ورودی در موتور استرلینگ

بهرام وزیری^۱، محمد آزادی^{۱*}، مجتبی بیگلری^۱، سید نوید مدنی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

چکیده

موتور استرلینگ یک موتور برونسوز است که کار مکانیکی را به برق تبدیل می‌کند. موتور استرلینگ برای کار کردن نیاز به سیال عامل دارد و معمولاً از هوا، هلیوم، هیدروژن، نیتروژن و غیره استفاده می‌شود. در میان سیال عامل‌های نام برده شده فقط هوا رایج‌تر است اما متأسفانه نسبت به سیال عامل‌های دیگر توان و بازدهی ضعیف‌تری دارد، پیش‌بینی می‌شود با ترکیب دو سیال عامل مانند هوا و هلیوم بتوان با هزینه کمتر توان و بازدهی مورد نظر دریافت کرد. اما برای بررسی این موضوع نیاز است تا به تحلیل حساسیت متغیرهای مختلف ورودی بر روی متغیرهای خروجی پرداخته شود. از این‌رو در این مطالعه به بررسی مدل ترمودینامیک غیرایده‌ال پرداخته است و نتایج الگوی ارائه شده با آزمایش تجربی صحت‌گذاری می‌شود. سپس با کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، ۱۲۶۰ آزمون طراحی شده و در نهایت، تأثیر تغییرات متغیرهای ورودی مانند سرعت، فشار تزریق گاز، دما و درصد هلیوم بر روی متغیرهای خروجی مانند توان، بازدهی، اتلاف حرارتی و هزینه بررسی شد. در ادامه مشخص شد هزینه فقط تابعی از فشار تزریق گاز و مقدار درصد ترکیب سیال‌ها است. همچنین نتایج نشان دادند که با افزایش دما، فشار، سرعت و درصد هلیوم، توان به ترتیب ۱۸۹ درصد، ۱۷۸ درصد، ۸۲ درصد و ۵۴ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش دما، سرعت و فشار، بازدهی به ترتیب ۴۲ درصد افزایش، ۲۳ درصد کاهش و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش دما، سرعت و فشار، اتلاف حرارتی به ترتیب ۸۵ درصد، ۷۱ درصد و ۳۵۷ درصد افزایش داشت.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

موتور استرلینگ
تحلیل حساسیت
توان
بازدهی
اتلاف حرارتی
هزینه سیال عامل



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: m_azadi@semnan.ac.ir (محمد آزادی)

دریافت ۲۰ تیر ۱۴۰۲؛ پذیرش ۱۵ آذر ۱۴۰۲

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Vaziri B, Azadi M, Biglari M, Madani SN. Sensitivity analysis for objectives of power, efficiency, heat loss, and working fluid cost based on input parameters in the Stirling engine. Engine Research. 2023 June 22;70(2):1-21. doi: 10.22034/ER.2023.2006618.1008

۱- مقدمه

موتور استرلینگ یک نوع موتور حرارتی است که انرژی حرارتی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. موتور استرلینگ در سال ۱۸۱۶ توسط رابرت استرلینگ، مهندس اسکاتلندی، اختراع شد. او این موتور را برای بهبود بهره‌وری کارخانه‌های بخاری طراحی کرده بود [۱]. به طور کلی موتور استرلینگ شامل دو محفظه سرد و گرم است که انواع سیال‌ها مانند هلیوم، هوا، هیدروژن و غیره درون این محفظه‌ها قرار دارند. با جابه‌جا شدن سیال عامل بین این دو محفظه به علت وجود اختلاف دما کار مکانیکی تولید شده و در نهایت کار مکانیکی توسط یک ژنراتور به برق تولید خواهد شد [۲].

در طی سالیان گذشته تحقیقات بسیاری در مورد موتور استرلینگ انجام شده است که در این تحقیقات الگوهای ترمودینامیکی متفاوت برای پیش‌بینی رفتار چرخه استرلینگ ارائه شده است که از مهم‌ترین این الگوها می‌توان به الگوی هم‌دما، آدیاباتیک ایده‌ال و آدیاباتیک غیرایده‌ال و غیره اشاره کرد [۳].

توپگل^۱ و همکاران [۴] بررسی تجربی اثرات اتصال سرد و داغ^۲ بر عملکرد موتور استرلینگ نوع گاما پرداختند. نتایج تجربی نشان می‌دهد در موتور اتصال داغ، حداکثر گشتاور و قدرت موتور ۵۶۶۵، نیوتن‌متر و ۲۳،۳۵ وات به دست آمد که در نتیجه نسبت به موتور اتصال سرد بترتیب ۶۸،۴ و ۸۴،۷ درصد افزایش داشت. کیم^۳ و همکاران [۵] به توسعه و اندازه‌گیری عملکرد یک مبدل استرلینگ پیستون آزاد کلاس ۲،۵ کیلووات با طراحی دقیق و فرآیندهای ساخت، با در نظر گرفتن اثرات سفتی فنر خمشی بر روی دینامیک و عملکرد موتور پرداخته‌اند. در نهایت دریافتند که خروجی الکتریکی و بازده موتور آزمایشی بترتیب ۲،۴۶ کیلووات و ۱۹،۴۶ درصد است. بتانه^۴ و همکاران [۶] به بررسی الگوی ترمودینامیکی عددی جدید برای موتور استرلینگ نوع بتا پرداختند. در نهایت دریافتند که تفاوت بین پیش‌بینی‌های الگوی فعلی و اندازه‌گیری‌های تجربی برای توان خروجی و بازده بترتیب ۴،۳ و ۳،۲۶ درصد (به عنوان تفاوت) است. یانگ^۵ و همکاران [۷] به بررسی عملکرد و حالت‌های یک موتور استرلینگ با تأخیر حرارتی با چرخ طیار پرداختند. در نهایت نتایج نشان داد که یک بارگذاری بهینه برای دستیابی به حداکثر توان وجود دارد. توماس^۶ و همکاران [۸] به بررسی مدل‌سازی و اثرات پروفیل حرکت کنترل‌شده جابه‌جا کننده بر خروجی کار پرداختند. در نهایت دریافتند که این الگو برای بهینه‌سازی کنترل حرکت جابه‌جایی با توجه به توان، بازده، یا سایر معیارهای عملکرد ترموکمپرسور برای هر ترموکمپرسور عمومی استرلینگ مناسب است.

استریپاکاگرن و اسریکام^۷ [۹]، عملکرد موتور استرلینگ را با اختلاف دمای متوسط بررسی کردند. در نهایت مشخص شد که موتور مورد بررسی در فشار نزدیک ۷ بار دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۳۶۰ دور بر دقیقه توان ۹۵،۴ وات تولید می‌کند. هوشنگ و همکاران [۱۰]، با استفاده از شبکه عصبی، موتور استرلینگ نوع گاما را بهینه‌سازی کردند. در این مطالعه سه نوع شرایط کاری ارائه شده است و در نهایت نتایج آزمایش تجربی با نتایج برنامه نوشته شده در این سه شرط باهم مقایسه شدند و مشخص شد که برنامه ارائه شده در این پژوهش قابل قبول است. طقیانی و همکاران [۱۱]، با کمک تحلیل مرتبه سوم به بهینه‌سازی موتور استرلینگ نوع بتا پرداختند. نتایج استخراج شده نشان می‌دهند که مقدار افت فشار در موتور استرلینگ بین ۰،۰۸ تا ۰،۲۸ بار و مقدار بازدهی بهینه حدود ۰،۳۸ تا ۰،۴۸ است. احمدی و همکاران [۱۲]، یک موتور استرلینگ خورشیدی را طراحی و بهینه کرده‌اند. در این مطالعه برای رسیدن به مقدار بهینه از روش‌های انتخابی مختلف استفاده شده است در نهایت مشخص شد که روش تصمیم‌گیری لینمپ بهترین نتیجه را دارد.

¹ Topgül

² Hot-end and Cold-end

³ Kim

⁴ Bataineh

⁵ Yang

⁶ Thomas

⁷ Sripakagorn and srikam

چنگ و یانگ^۱ [۱۳] در این مطالعه ترکیب بهینه‌ای از نسبت حجم جاروب شده و زاویه فاز را در شرایط کاری مختلف بررسی کردند. در نهایت مشخص شد موتور استرلینگ نوع بتا و نوع گاما بترتیب قویترین و ضعیفترین توان را دارند. پاتل و ساوسانی^۲ [۱۴]، با استفاده از روش آموزش و یادگیری خود الهام بخش مبتنی بر آموزش-یادگیری موتور را بهینه‌سازی کردند. در نهایت مشخص شد که در بهینه‌سازی دو هدفه، تغییرات افت فشار و قدرت خروجی بترتیب ۷۹،۵۸ درصد و ۸۷،۵۹ درصد بوده است. احمدی و همکاران [۱۵]، به بهینه‌سازی چندهدفه روش ترمودینامیک سرعت محدود پرداختند. در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک برای انجام بهینه‌سازی استفاده شده است که در آن متغیرهای طراحی شامل سرعت موتور، فشار ورودی، دمای منبع سرد و گرم، اختلاف دمای منبع سرد و گرم با نقاط دیگر، کورس پیستون و قطر سیلندر است و تابع هدف انتخاب شده شامل افت فشار، توان موتور و بازدهی نیز بوده است. در نهایت دریافتند که نتایج به دست آمده نسبت به مطالعات قبلی قابلیت صحه‌گذاری دارد و قابل قبول است. پاناتانام و کتچا^۳ [۱۶]، به بهینه‌سازی چند هدفه با کمک الگوریتم ژنتیک (نسخه دوم) بر روی موتور استرلینگ پرداختند. در انتها محققین این مطالعه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف ارائه شده با یکدیگر مقایسه کردند.

حسینی‌زاده و صیادی [۱۷]، نتایج حاصل از دو روش ترمودینامیکی سرعت محدود و آدیاباتیک را با یکدیگر ترکیب کردند و در انتها به بهینه‌سازی نتایج ارائه شده پرداختند. در نهایت محققین دریافتند که این کار باعث کاهش ۰،۸۶۱ برابر توان اتلافی، افزایش ۲،۳۴ برابری قدرت موتور و افزایش ۲۳،۱ درصدی بازدهی شده است. حسن‌زاده و همکاران [۱۸]، به بررسی تجربی موتور استرلینگ نوع گاما برای تولید سرمایش با استفاده از گازهای مختلف پرداختند. در نهایت دریافتند که زمان روشن شدن منبع تغذیه، افزایش توان منبع تغذیه، فشار متوسط گاز و استفاده از سیال عامل سبک‌تر مانده هوا و هلیوم در تولید سرمایش موثر خواهد بود. وزیری و همکاران [۱۹] اثر وابستگی خواص ترمودینامیکی سیال عامل به دما را بر عملکرد موتور استرلینگ نوع گاما بررسی کردند. در نهایت دریافتند که مقدار درصد تغییرات توان و بازدهی و اتلاف حرارتی در دو حالت پراوتل ثابت و متغیر برای هلیوم کمتر از ۶ درصد و برای گاز هیدروژن کمتر از ۵ درصد و برای هوا کمتر از ۱۲ درصد بوده است. شافت^۴ و همکاران [۲۰]، با کمک موتور استرلینگ به بررسی مقدار تولید برق با گازهای هلیوم و هوا در فشارهای متفاوت پرداختند. در نهایت دریافتند که توان تولید شده توسط هلیوم نسبت به توان تولید شده توسط هوا در فشار ثابت می‌تواند تا ۳۵ برابر بیشتر شود. احمد و همکاران [۲۱] به بررسی یک الگوی عددی جدید همراه با الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای طراحی بهینه موتور استرلینگ پرداختند. نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه نشان می‌دهد که توان خروجی تقریباً ۵۰۰ وات افزایش می‌یابد و بازده حدود ۵ درصد افزایش می‌یابد در حالی که تلفات تا ۵۱۶ وات کاهش می‌یابد. یانگ و همکاران [۲۲] به مطالعه پارامتری و بهینه‌سازی طراحی یک موتور استرلینگ نوع بتا پرداختند. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که حداکثر توان خروجی موتور نمونه اولیه را می‌توان از ۱۱۳۷ وات به ۱۵۰۳ وات افزایش داد. بازده حرارتی و بازده مکانیکی نیز می‌تواند بترتیب به ۱۳،۵ درصد و ۹۴،۳ درصد افزایش یابد. الفاراوی^۵ و همکاران [۲۳] به الگوی سازی ترمودینامیکی پیشرفته موتور استرلینگ نوع گاما پرداختند. در نهایت مشخص شد که وقتی دمای خنک‌کننده به ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد در حالی که دمای منبع گرم در ۶۵۰ درجه سانتیگراد ثابت می‌ماند، توان موتور را می‌توان به مقدار ۴۹ درصد برای هلیوم و ۳۵ درصد برای نیتروژن افزایش داد.

باتوجه به مطالعات انجام شده مشخص شده است که بسیاری از مطالعات [۱۰-۱۷] برای بهینه‌سازی توان و بازدهی بر روی موتور استرلینگ انجام شده است که در آنها از روش‌های مختلف بهینه‌سازی با روش تصمیم‌گیری‌های متفاوت استفاده شده است، اکثر مطالعات بر روی موتور استرلینگ نوع بتا انجام شده است [۶، ۱۱، ۱۷، ۲۰-۲۲] در حالی که

¹ Cheng and Yang

² Patel and Savsani

³ Punnathanam and kotecha

⁴ Shufat

⁵ Alfarawi

مطالعه حاضر بر روی موتور استرلینگ گاما انجام شده است و همچنین بیشتر مطالعات بر روی سیال عامل های هوا، هلیوم، هیدروژن و غیره بوده است [۴-۸، ۱۰-۱۱، ۱۷-۲۳] که این سیال عامل ها هر کدام به صورت جداگانه بررسی شده اند و مشخص شده است بترتیب هیدروژن، هلیوم و هوا بیشترین توان و بازدهی را دارند همچنین در مطالعات مختلف از معادلات ترمودینامیکی مختلفی استفاده شده است که تفاوت آنها در محاسبه تلفات موتور استرلینگ است. باتوجه به هزینه گران سیال های عامل، به عنوان نوآوری در این پژوهش قصد بر آن است که به بررسی ترکیب دو سیال عامل هوا و هلیوم پرداخته شود، باتوجه به این که در ایران گاز هلیوم دارای هزینه گران است. بنابراین ترکیب دو سیال عامل نظیر هوا و هلیوم و یافتن مقدار بهینه از ترکیب این دو سیال می تواند در کاهش هزینه تأثیر قابل توجهی ایجاد کند به همین دلیل در پژوهش حاضر توابع هدف توان، بازده، اتلاف حرارتی و هزینه سیال عامل، تحلیل حساسیت می شوند. مبنای اینکار متغیرهای ورودی مانند دما، فشار، سرعت و درصد ترکیب سیال عامل هوا و هلیوم در موتور استرلینگ است. این پژوهش با کمک الگوی ترمودینامیکی آدیاباتیک غیرایدهال انجام شده است.

۲- مدل ترمودینامیکی آدیاباتیک غیرایدهال

مدل ترمودینامیکی آدیاباتیک غیرایدهال بر پایه الگوی آدیاباتیک ایدهال است با این تفاوت که برخی تلفات که در الگوی ایدهال لحاظ نشده است در الگوی غیرایدهال لحاظ می شود معادلات الگوی ایدهال در مرجع [۲۴] ارائه شده است. همانگونه که پیشتر بیان شد تفاوت الگوی آدیاباتیک ایدهال با غیرایدهال در تلفات فشار و انتقال حرارت در مبدل حرارتی است:

$$dP_R = 2f\mu V_r G l_r / m_r d_r^2 \quad (۱)$$

که dP_R افت فشار و f ضریب اصطکاک برای بازیابی است.

$$f = 54 + 1.43Re^{0.78} \quad (۲)$$

افت فشار و ضریب اصطکاک خنک کننده و گرم کننده از معادله ۳ و ۴ محاسبه خواهد شد. همچنین ضریب اصطکاک آنها از معادله ۵ محاسبه می شود.

$$dP_H = 2f\mu V_h G l_h / m_h d_h^2 \quad (۳)$$

$$dP_K = 2f\mu V_k G l_k / m_k d_k^2 \quad (۴)$$

$$f = 0.0791Re^{0.75} \quad (۵)$$

افت فشار کلی در موتور برابر با جمع تمامی افت های فشار است که در معادلات ۱، ۳ و ۴ بیان شده است. باتوجه به افت های فشار محاسبه شده مقدار توان از دست رفته از طریق بازیاب از معادله ۶ محاسبه خواهد شد.

$$W_{loss} = f_r \int (dP dV) \quad (۶)$$

علاوه بر افت فشار تلفات حرارتی در بازیاب وجود دارد که این تلفات توسط معادلات ۷-۹ محاسبه خواهد شد.

$$Q_{r,loss} = (1 - \varepsilon)(Q_{r,max} - Q_{r,min}) \quad (۷)$$

$$\varepsilon = NTU / (NTU + 1) \quad (۸)$$

$$NTU = St \times A_{wg} / 2A \quad (۹)$$

انرژی حرارتی واقعی در خنک کننده، گرم کننده و بازدهی حرارتی موتور استرلینگ از معادلات ۱۰-۱۲ محاسبه می شود.

$$Q_H = Q_h + Q_{r,loss} \quad (۱۰)$$

$$Q_K = Q_k - Q_{r,loss} \quad (۱۱)$$

$$\eta = (W - W_{loss}) / Q_H \quad (۱۲)$$

برای ترکیب دو سیال عامل از معادلات ۱۳-۲۱ استفاده خواهد شد.

$$c_i = m_i / m_{mix} \quad (13)$$

$$c_{pmix} = \sum c_i c_{p_i} \quad (14)$$

$$c_{vmix} = \sum c_i c_{v_i} \quad (15)$$

$$m_{mix} = m_1 + m_2 \quad (16)$$

$$R_{mix} = c_{pmix} - c_{vmix} \quad (17)$$

$$\gamma_{mix} = c_{pmix} / c_{vmix} \quad (18)$$

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i / (\sum_{j=1}^n x_j \varphi_{ij}) \quad (19)$$

$$\varphi_{ij} = \left[1 + (\mu_i / \mu_j)^{0.5} (M_j / M_i)^{0.25} \right]^2 / (8 + 8M_i / M_j)^{0.5} \quad (20)$$

$$x_i = (c_i / M_i) / \sum_{j=1}^n (c_j / M_j) \quad (21)$$

شکل ۱ روش حل الگوی آدیاباتیک غیرایده‌ال را نشان می‌دهد. در این مطالعه از دو سیال عامل هوا و هلیوم استفاده شده است. هوا به عنوان یک گاز رایگان است در حالی که هلیوم به عنوان یک گاز گران قیمت شناخته می‌شود، به گونه‌ای که قیمت مخزن تحت فشار گاز هلیوم ۵۰ لیتری با فشار ۲۰۰ حدود ۷ میلیون تومان تخمین زده می‌شود. به علت وجود نشتی گاز تزریق شده در موتور هر ۲ ساعت تخلیه می‌شود. بنابراین در صورتی که موتور ۲۴ ساعت روشن باشد نیاز است تا روزی ۱۲ بار باید موتور از گاز پُر شود. معادلات ۲۲-۲۵ نحوه محاسبه قیمت گاز مصرفی هلیوم را نشان می‌دهد که بترتیب تعداد دفعات پُر شدن موتور از گاز^۱، تعداد روزهای مورد استفاده از یک مخزن تحت فشار^۲، تعداد ساعت ساعت مورد استفاده از یک مخزن تحت فشار^۳ و هزینه گاز مورد استفاده در هر یک ساعت^۴ را محاسبه می‌کنند.

$$CT = 1.6 / M \quad (22)$$

$$NDC = CT / 12 \quad (23)$$

$$DC = NDC \times 24 \quad (24)$$

$$CPH = 70 \times 10^6 / DC = 70 \times 10^6 M / 3.2 \quad (25)$$

۳- اعتبارسنجی

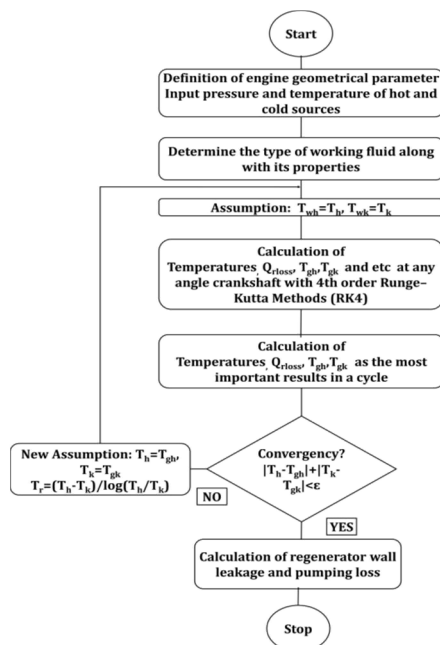
برای اعتبارسنجی و اطمینان از صحت برنامه نوشته شده، الگوی ترمودینامیکی ارائه شده با آزمایش تجربی در سه شرایط کاری مختلف بررسی شده است. جدول ۱ شرایط کاری موتور و شکل ۲ نمودار اندیکاتوری فشار بر حسب حجم را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود الگوی ترمودینامیکی ارائه شده به آزمایش تجربی نزدیک است و علت وجود خطا در الگوی ارائه شده در نظر نگرفتن برخی تلفات مانند تشعشع است که باعث می‌شود در محاسبات الگوی ترمودینامیکی دمای منبع انبساط داغتر از دمای آزمایش تجربی باشد. همچنین تحقیقات [۲۹-۲۵] از الگوی ترمودینامیکی آدیاباتیک غیرایده‌ال استفاده کرده‌اند و بترتیب به ۱۲۳،۳، ۹۹،۰، ۱۵۲،۸۳، ۱۷۶،۸۶ و ۶۹،۲۵ درصد خطا نسبت به آزمایش تجربی دست یافتند درحالی که برنامه مورد استفاده در این مطالعه بین ۱۳ تا ۲۳ درصد خطا رسیده است که نسبت به مطالعات پیشین این مقدار قابل قبول است. شکل ۳ موتور مورد استفاده در این آزمایش را نشان می‌دهد.

¹ Charging Time (CT)

² Number of Days for a Capsule (NDC)

³ Duration for a Capsule (hrs) (DC)

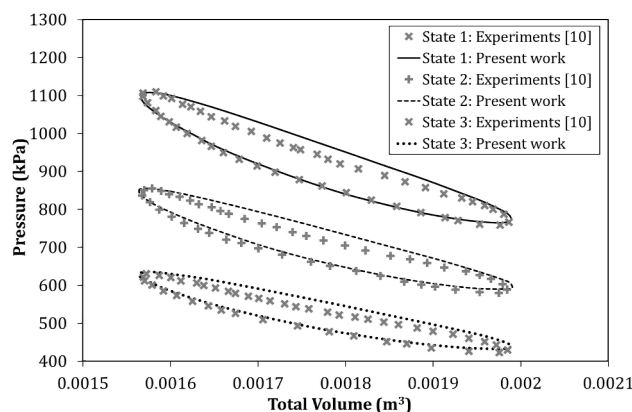
⁴ Cost Per Hour (CPH)



شکل ۱ روش حل الگوی ترمودینامیکی آدیاباتیک غیرایده‌ال

جدول ۱ شرایط کاری موتور استرلینگ برای اعتبارسنجی

شرایط	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
فشار وارده (پاسکال)	۸۱۰۰۰۰	۶۲۰۰۰۰	۴۶۰۰۰۰
دمای خنک کننده (درجه سانتیگراد)	۳۳,۵	۴۰	۳۵
دمای گرمکن (درجه سانتیگراد)	۳۵۳	۳۵۰	۳۵۵
سرعت (دور بر دقیقه)	۹۷۰	۹۵۰	۸۰۰
توان نظری (وات)	۴۶۵	۳۶۴	۲۳۸

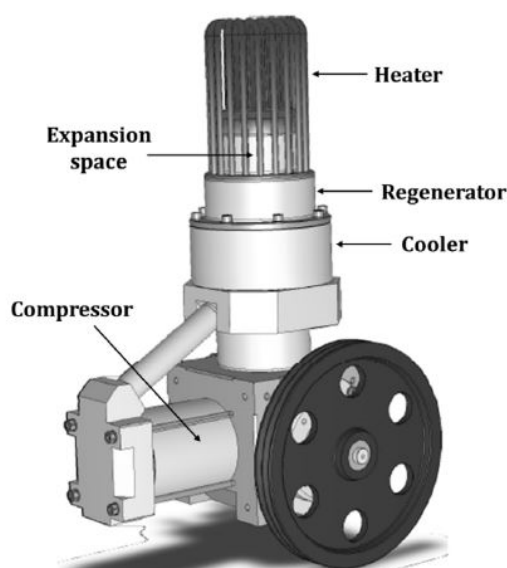


شکل ۲ مقایسه نتایج خروجی از الگوی ترمودینامیکی با آزمایش تجربی

۴- تحلیل حساسیت و نتایج آن

برای تحلیل حساسیت متغیرهای مد نظر توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت^۱ تعداد ۱۲۶۰ آزمایش طراحی شده است. جزئیات آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

¹ Design Expert



شکل ۳ موتور مورد استفاده برای آزمون اعتبارسنجی [۳۰]

جدول ۲ آزمایش‌های طراحی شده

متغیرها	تعداد سطوح	سطوح تغییرات	تعداد دفعات اجرای برنامه
دمای منبع گرم (درجه سانتیگراد)	۶	۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰، ۶۵۰، ۷۵۰ و ۸۵۰	۱۲۶۰
فشار (بار)	۵	۴، ۸، ۱۰ و ۱۲	
سرعت (دور بر دقیقه)	۷	۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰	
هلیوم (درصد)	۶	صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰	

تمام آزمایش‌های ارائه شده در جدول ۲ توسط الگوی ترمودینامیکی اجرا شده‌اند و نتایج آنها توسط نرم‌افزار دیزان اکسپرت بررسی شده است. جدول ۳ تا ۶ نتایج تحلیل داده‌ها برای توان، بازدهی، اتلاف حرارتی و هزینه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است تمام الگوها دارای P-Value کمتر از ۰,۰۵ هستند و به این معنا است که الگوی انتخاب شده برای تحلیل مناسب است. لازم به ذکر است که برای تصمیم‌گیری راحت نسبت به نتایج آزمون‌های طراحی شده در نرم‌افزارهای آماری، شاخصی به نام مقدار احتمال P-Value ارائه می‌شود، در صورتی که مقادیر دارای P-Value زیر ۰,۰۵ باشند، حائز اهمیت می‌شوند [۳۱].

جدول ۳ تحلیل حساسیت داده‌ها برای توان

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	Effectiveness
Mean vs Total	8.099E+08	1	8.099E+08			
Linear vs Mean	2.144E+08	4	5.359E+07	2741.24	< 0.0001	
2FI vs Linear	1.930E+07	6	3.216E+06	802.63	< 0.0001	
Quadratic vs 2FI	2.159E+05	4	53974.24	14.04	< 0.0001	
Cubic vs Quadratic	3.369E+06	20	1.684E+05	149.84	< 0.0001	
Quartic vs Cubic	7.768E+05	35	22194.05	44.70	< 0.0001	Suggested
Fifth vs Quartic	2.044E+05	55	3716.36	10.98	< 0.0001	Aliased
Residual	3.790E+05	1120	338.36			
Total	1.049E+09	1245	8.422E+05			

جدول ۴ تحلیل حساسیت داده‌ها برای بازدهی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	Effectiveness
Mean vs Total	59684.73	1	59684.73			
Linear vs Mean	2827.46	4	706.86	1991.63	< 0.0001	
2FI vs Linear	25.12	6	4.19	12.45	< 0.0001	
Quadratic vs 2FI	104.03	4	26.01	102.80	< 0.0001	
Cubic vs Quadratic	147.04	20	7.35	54.13	< 0.0001	
Quartic vs Cubic	153.00	35	4.37	442.66	< 0.0001	Suggested
Fifth vs Quartic	9.44	55	0.1717	88.25	< 0.0001	Aliased
Residual	2.18	1122	0.0019			
Total	62952.99	1247	50.48			

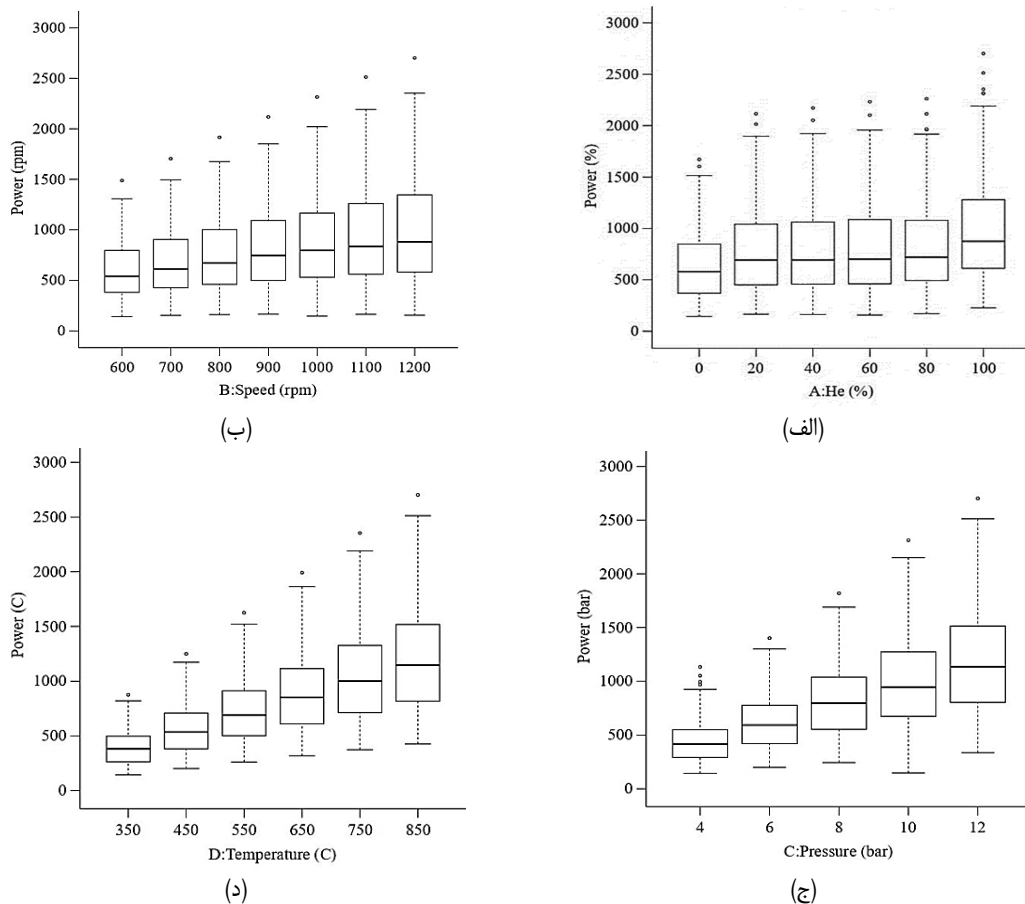
جدول ۵ تحلیل حساسیت داده‌ها برای تلفات حرارتی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	Effectiveness
Mean vs Total	1.111E+11	1	1.111E+11			
Linear vs Mean	3.077E+10	4	7.693E+09	2479.02	< 0.0001	
2FI vs Linear	2.724E+09	6	4.541E+08	501.56	< 0.0001	
Quadratic vs 2FI	4.096E+08	4	1.024E+08	178.27	< 0.0001	
Cubic vs Quadratic	1.868E+08	20	9.341E+06	21.77	< 0.0001	
Quartic vs Cubic	3.659E+08	35	1.046E+07	80.57	< 0.0001	Suggested
Fifth vs Quartic	8.770E+07	55	1.595E+06	27.67	< 0.0001	Aliased
Residual	6.438E+07	1117	57636.43			
Total	1.457E+11	1242	1.173E+08			

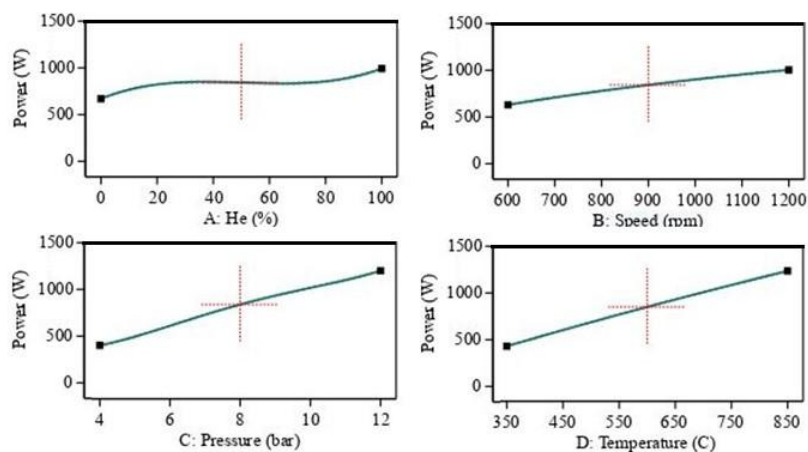
جدول ۶ تحلیل حساسیت داده‌ها برای هزینه هلیوم

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	Effectiveness
Mean vs Total	9.910E+09	1	9.910E+09			
Linear vs Mean	5.878E+09	4	1.469E+09	3183.75	< 0.0001	
2FI vs Linear	5.792E+08	6	9.653E+07	3.029E+06	< 0.0001	
Quadratic vs 2FI	8688.61	4	2172.15	86.90	< 0.0001	
Cubic vs Quadratic	5984.38	20	299.22	14.58	< 0.0001	
Quartic vs Cubic	3937.19	35	112.49	6.32	< 0.0001	Suggested
Fifth vs Quartic	4441.62	55	80.76	5.47	< 0.0001	Aliased
Residual	16755.59	1135	14.76			
Total	1.637E+10	1260	1.299E+07			

شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات توان با تغییر درصد هلیوم، سرعت، دما و فشار را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است با افزایش دما، فشار و سرعت توان نیز افزایش پیدا می‌کند که این موضوع در مراجع [۲۹ و ۳۲-۳۳] قابل مشاهده است. همچنین مشخص شده است که با افزایش درصد هلیوم توان در ابتدا افزایش و سپس تا حدودی ثابت است ولی با رسیدن به مقدار درصد هلیوم به ۱۰۰ درصد توان دوباره افزایش می‌یابد به گونه‌ای که از ۰ تا ۱۰۰ درصد توان حدود ۵۴ درصد افزایش خواهد داشت. همچنین مشخص است که با افزایش سرعت از ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه توان حدود ۸۲ درصد افزایش می‌یابد و با تغییر دما از ۳۵۰ تا ۸۵۰ درجه توان حدود ۱۸۹ درصد افزایش خواهد داشت و همچنین با تغییر فشار از ۴ تا ۱۲ بار توان حدود ۱۷۸ درصد افزایش می‌یابد، که نشان دهنده آن است بترتیب دما، فشار سرعت و درصد هلیوم بیشترین تأثیر را بر توان خواهند داشت.

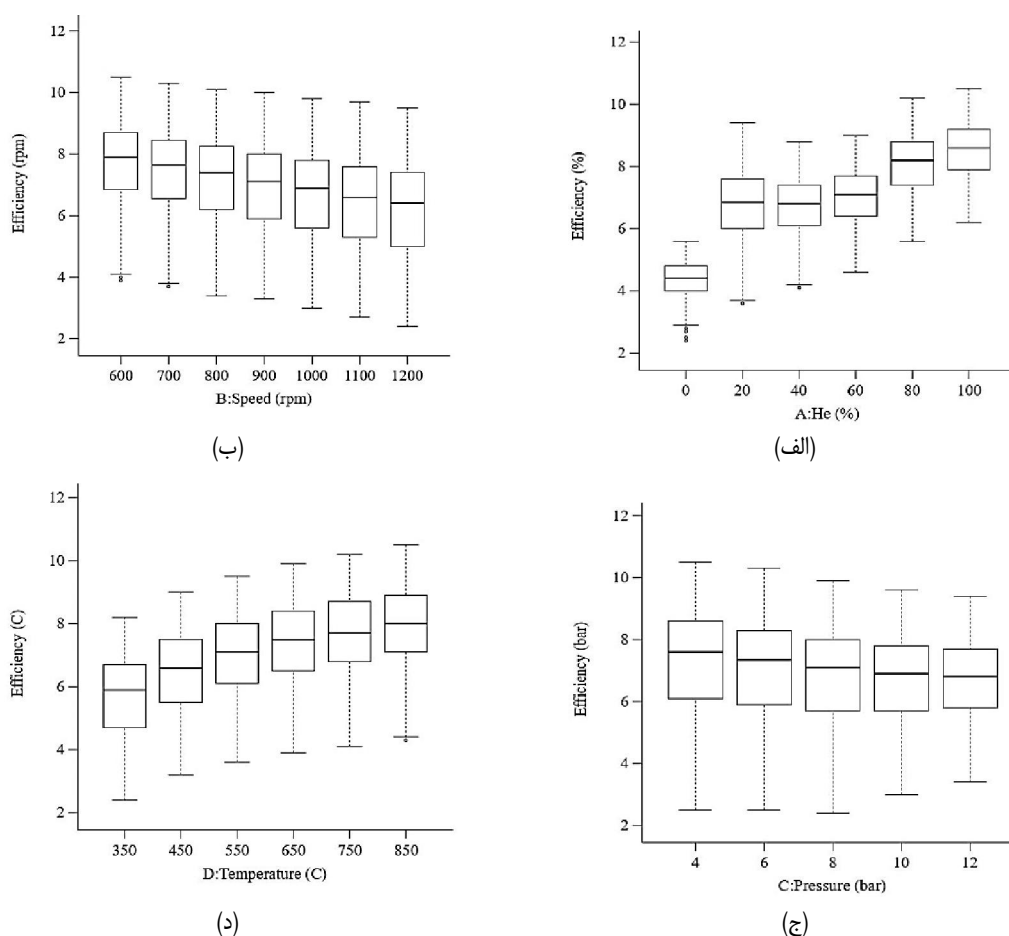


شکل ۴ پراکندگی تغییرات توان با ورودی‌های مختلف: (الف) تغییر توان با تغییر درصد هلیوم، (ب) تغییر توان با تغییر سرعت، (ج) تغییر توان با تغییر فشار و (د) تغییر توان با تغییر دما

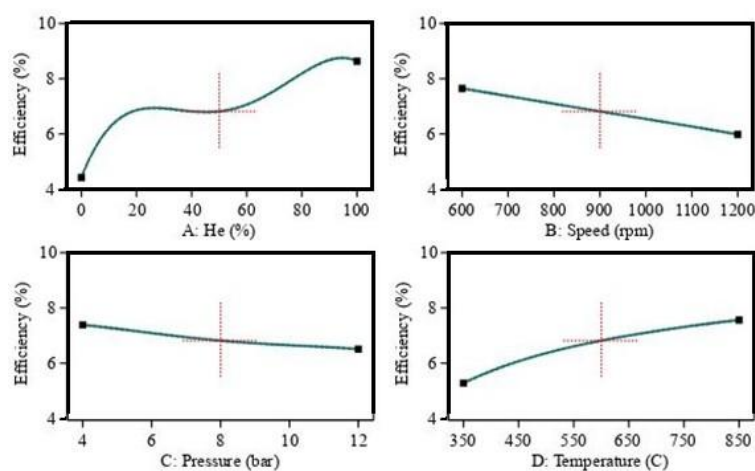


شکل ۵ تأثیر متغیرهای ورودی بر توان خروجی

شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات بازدهی با تغییر درصد هلیوم، سرعت، دما و فشار را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است با افزایش سرعت بازدهی کاهش می‌یابد که این نتایج در نتایج احمدی و همکاران [۳۳] نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۶ اسکتر باند تغییرات بازدهی با ورودی‌های مختلف: (الف) تغییر بازدهی با تغییر درصد هلیوم، (ب) تغییر بازدهی با تغییر سرعت، (ج) تغییر بازدهی با تغییر فشار و (د) تغییر بازدهی با تغییر دما

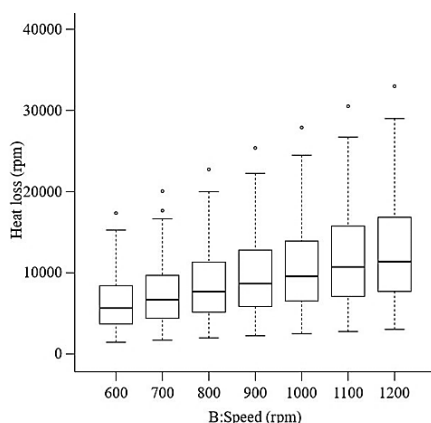


شکل ۷ تأثیر متغیرهای ورودی بر بازدهی

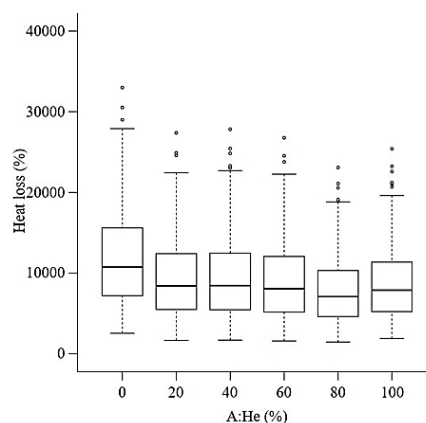
علت کاهش بازدهی، افزایش سرعت موتور است که با افزایش سرعت، یک چرخه کامل در زمان کوتاه‌تری طی می‌شود در نتیجه موتور حرارت بیشتری در این حالت دریافت می‌کند که موجب کاهش بازدهی موتور می‌شود [۳۰].

همچنین باتوجه به شکل ۶ و ۷ مشخص شده است که با افزایش دما بازدهی افزایش خواهد داشت که لی و همکاران نیز به این نتیجه دست یافته‌اند [۳۲]. همچنین مشخص شده است که با افزایش فشار بازدهی کاهش می‌یابد که علت آن این است که با افزایش فشار مقدار گاز بیشتری از نظر جرمی به موتور تزریق خواهد شد و درنتیجه موتور نیاز دارد حرارت بیشتری را جذب کند که همین امر باعث کاهش بازدهی حرارتی می‌شود [۳۰]. باتوجه به شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دریافت که به طور کلی با افزایش درصد هلیوم بازدهی افزایش خواهد داشت که بخاطر ضریب گرمای ویژه بزرگ هلیوم و وزن کمتر هلیوم نسبت به هوا است اما لازم به ذکر است که با افزایش درصد هلیوم از ۲۰ تا ۶۰ درصد تغییرات بازدهی زیاد نیست ولی در حالت کلی با افزایش درصد هلیوم از صفر تا ۱۰۰ درصد بازدهی حدود ۱۱۰ درصد افزایش خواهد داشت. همچنین مشخص است که با افزایش سرعت از ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، افزایش دما از ۳۵۰ تا ۸۵۰ درجه و افزایش فشار از ۴ تا ۱۲ بازدهی بترتیب ۲۳ درصد کاهش، ۴۲ درصد افزایش و ۱۷ درصد کاهش یافته است.

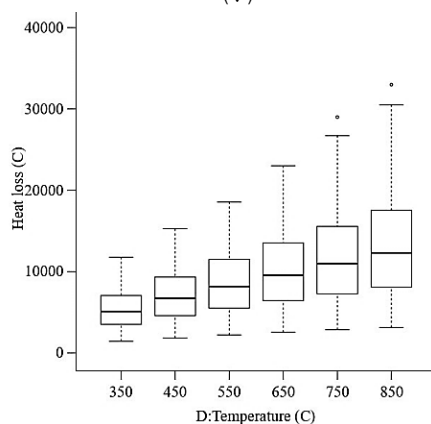
شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات اتلاف حرارتی را با تغییر دما، فشار، سرعت و درصد هلیوم نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است با افزایش سرعت، فشار و دمای اتلاف حرارتی به طور پیوسته افزایش خواهد داشت که این نتیجه با نتایج مرجع [۲۴] مطابقت دارد ولی با افزایش درصد هلیوم به طور کلی اتلاف کاهش می‌یابد علت آن ظرفیت گرمایی ویژه بزرگتر نسبت به هوا است زیرا در این حالت سیال می‌تواند حرارت بیشتری را جذب کند. اما تغییرات تلفات حرارتی از ۲۰ تا ۶۰ درصد هلیوم ناچیز است. همچنین مشخص است که با افزایش سرعت از ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، افزایش دما از ۳۵۰ تا ۸۵۰ درجه و افزایش فشار از ۴ تا ۱۲ اتلاف حرارتی بترتیب ۷۱ درصد افزایش، ۸۵ درصد افزایش و ۳۵۷ درصد افزایش یافته است. که نشان دهنده آن است که فشار بیشترین تأثیر را بر اتلاف حرارتی دارد.



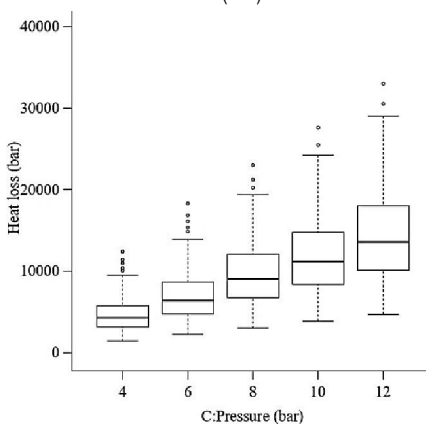
(ب)



(الف)

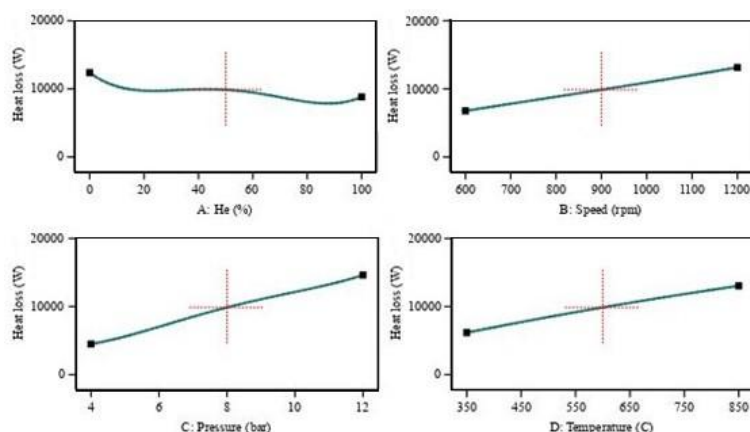


(د)



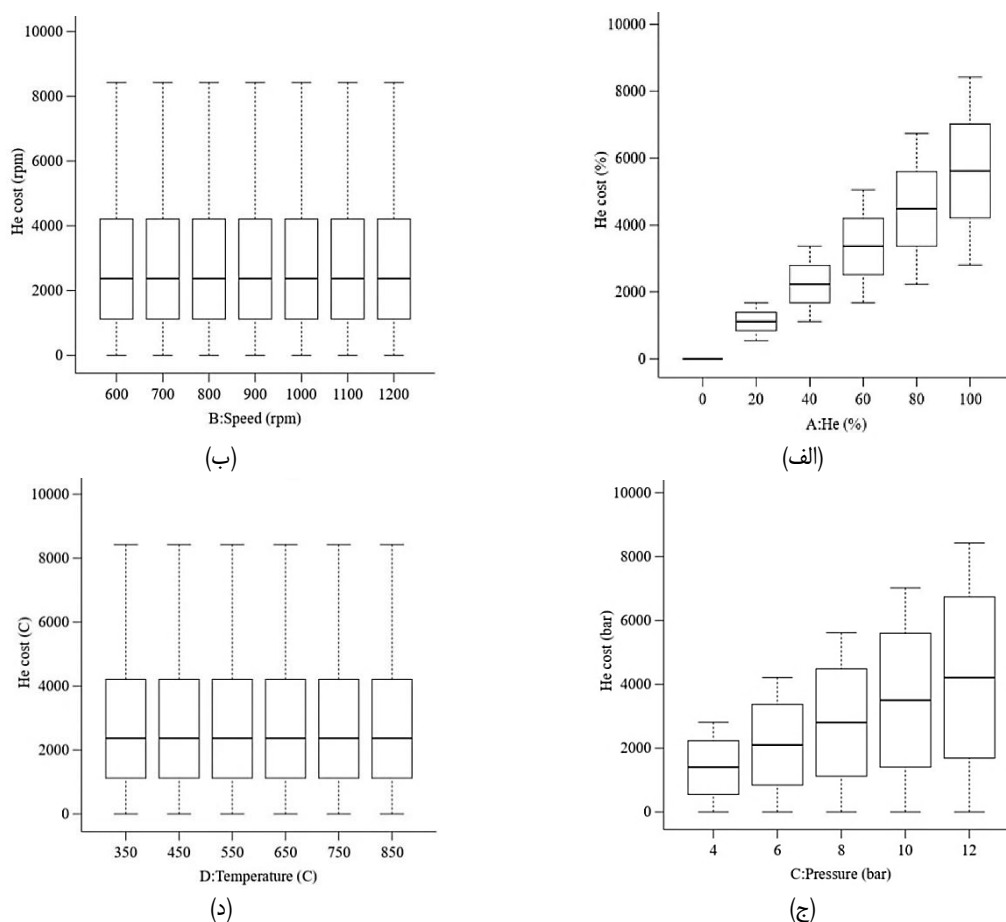
(ج)

شکل ۸ پراکندگی اتلاف حرارتی با ورودی‌های مختلف: الف) تغییر اتلاف حرارتی با تغییر درصد هلیوم، ب) تغییر اتلاف حرارتی با تغییر سرعت، ج) تغییر اتلاف حرارتی با تغییر فشار و د) تغییر اتلاف حرارتی با تغییر دما

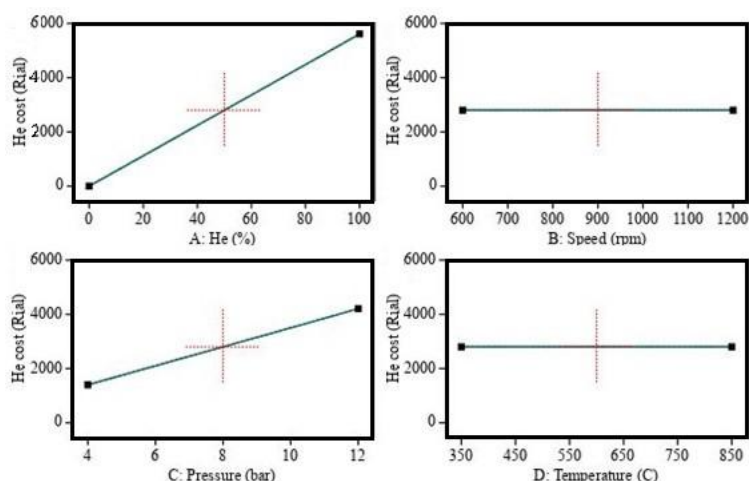


شکل ۹ تأثیر متغیرهای ورودی بر اتلاف حرارتی

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات هزینه را براساس توان، بازدهی، فشار و سرعت نشان می‌دهد همانگونه که از شکل ۷ مشخص است درصد هلیوم و فشار به طول کامل با هزینه وابستگی مستقیم دارد ولی دما و سرعت هیچ گونه ارتباطی با هزینه ندارند. همچنین از شکل ۱۱ مشخص است که تأثیر درصد هلیوم بر هزینه بیشتر از تأثیر فشار تزریق گاز بر هزینه است زیرا شیب نمودار درصد هزینه بر حسب درصد هلیوم بیشتر از شیب نمودار درصد فشار بر حسب درصد هلیوم است.

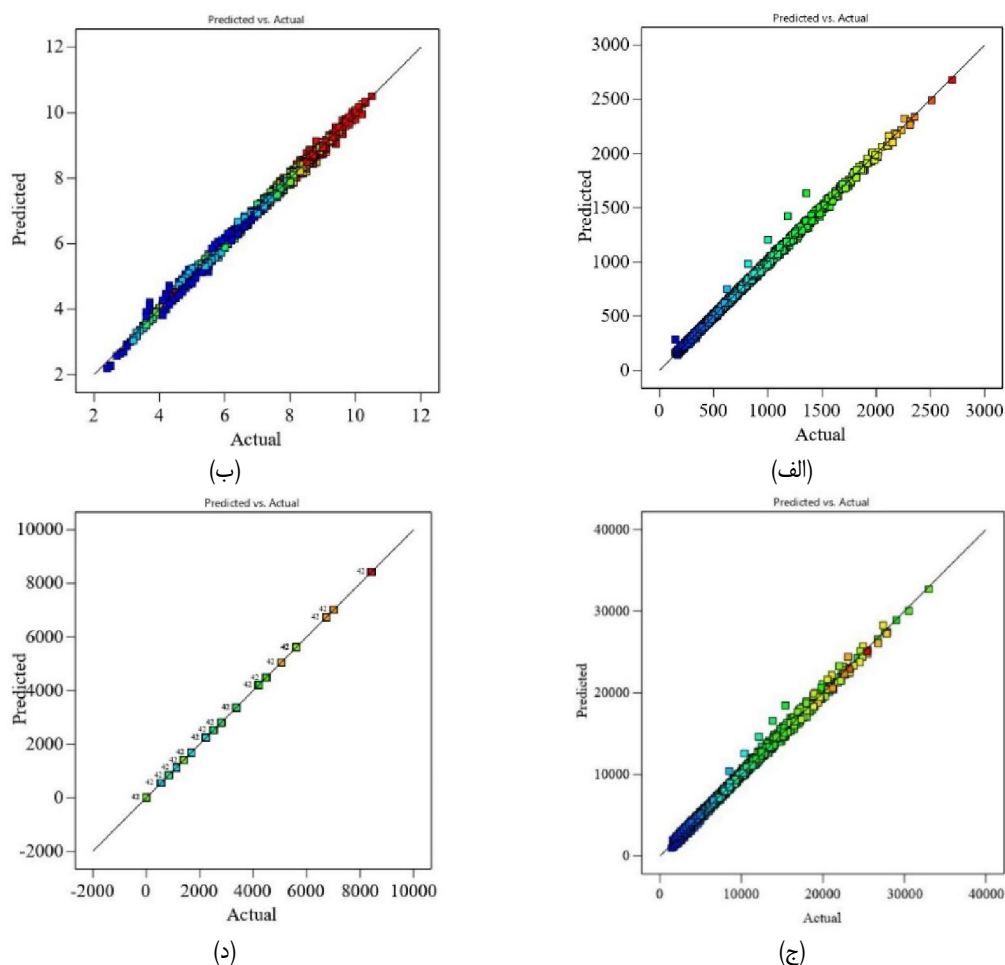


شکل ۱۰ پراکندگی هزینه با ورودی‌های مختلف: الف) تغییر هزینه با تغییر درصد هلیوم، ب) تغییر هزینه با تغییر سرعت، ج) تغییر هزینه با تغییر فشار و د) تغییر هزینه با تغییر دما



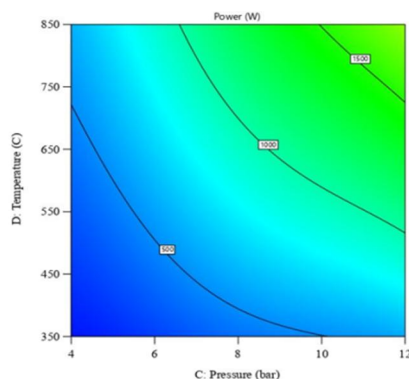
شکل ۱۱ تأثیر متغیرهای ورودی بر هزینه

شکل ۱۲ نمودار مقدار واقعی نسبت به مقدار پیش‌بینی شده در تحلیل حساسیت را برای توان، بازدهی، اتلاف حرارتی و هزینه را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۸ مشخص است داده‌ها بر روی خط وسط نمودارها است که نشان دهنده دقیق بودن داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به داده‌های تجربی است که صحت الگوی استفاده شده در تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

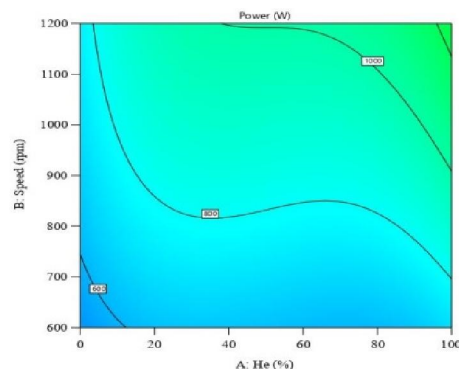


شکل ۱۲ پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی برای (الف) توان، (ب) بازدهی، (ج) اتلاف حرارتی و (د) هزینه

شکل‌های ۱۳ و ۱۴-الف مشخص است که با افزایش سرعت و درصد هلیوم به صورت همزمان توان افزایش می‌یابد به گونه‌ای که بیشینه توان در تندترین سرعت و درصد هلیوم است. همچنین شکل ۱۴-الف نشان می‌دهد مقدار بهینه درصد هلیوم برای توان حدود ۲۰ درصد است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴-ب نشان می‌دهد که با افزایش دما و فشار به صورت همزمان توان افزایش می‌یابد و بیشتر مقدار توان در شدیدترین دما و فشار تزریقی است از طرفی همانگونه که قبلاً هم در این مطالعه و هم در مطالعات محققان دیگر [۳۲-۳۳، ۲۹] اشاره شد، دما و فشار هر کدام به تنهایی هم باعث افزایش توان می‌شوند بنابراین می‌توان دریافت که تقابل این دو متغیر نیز مثبت است و باعث افزایش توان می‌گردد. احمدی و همکاران [۳۳] دریافت بودند که افزایش سرعت باعث کاهش بازدهی می‌گردد اما تقابل سرعت و درصد هلیوم بررسی نشده بود با بررسی این دو مورد در شکل‌های ۱۵ و ۱۶-الف مشخص شده است که بیشتر مقدار بازدهی زمانی است که سرعت در حالت بدون بار و درصد هلیوم در بزرگترین مقدار خود باشد همچنین مشخص شده است که مقدار بهینه درصد هلیوم برای بازدهی حدود ۳۲ درصد است. لی و همکاران [۳۲] به این نتیجه دست یافته بودند که افزایش فشار و دما هر کدام به تنهایی باعث افزایش بازدهی می‌گردد، در این مطالعه شکل‌های ۱۵ و ۱۶-ب نیز نشان می‌دهد که با افزایش همزمان دما و فشار (تقابل هر دو متغیر) نیز بازدهی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت، دما و فشار باعث افزایش اتلاف و افزایش درصد هلیوم باعث کاهش اتلاف می‌گردد [۲۴]، شکل‌های ۱۷ و ۱۸-الف نشان می‌دهد در تقابل دو متغیر سرعت و درصد هلیوم کمترین مقدار برای اتلاف حرارتی زمان است که به صورت همزمان سرعت در کندترین و درصد هلیوم در بیشترین مقدار خود باشد. همچنین می‌توان مشخص کرد که مقدار بهینه اتلاف حرارتی برای درصد هلیوم حدود ۵۰ درصد است. همچنین شکل‌های ۱۷ و ۱۸-ب مشخص می‌کند که در تقابل دو متغیر دما و فشار، در پایین‌ترین دما و فشار نیز تلفات کمترین مقدار است. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهد افزایش فشار و درصد هلیوم به تنهایی بر روی هزینه تأثیر می‌گذارد و دما و سرعت هیچگونه تأثیری بر روی هزینه ندارد.

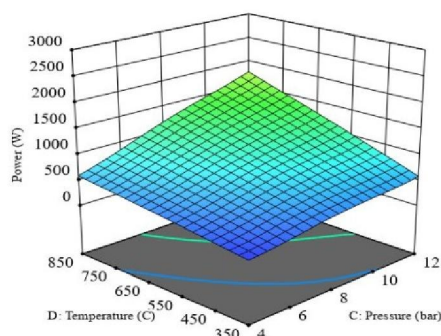


(ب)

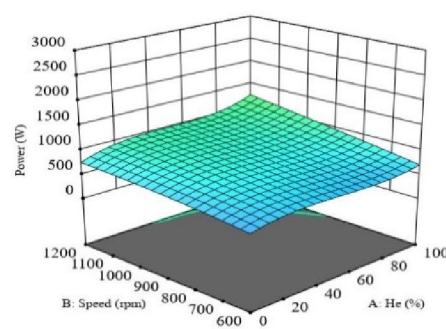


(الف)

شکل ۱۳ نقشه توان برحسب متغیرهای ورودی مختلف: الف) تغییرات توان برحسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و ب) تغییرات توان بر حسب تغییر فشار و دما

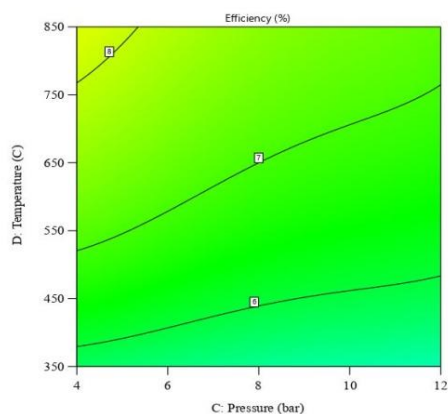


(ب)

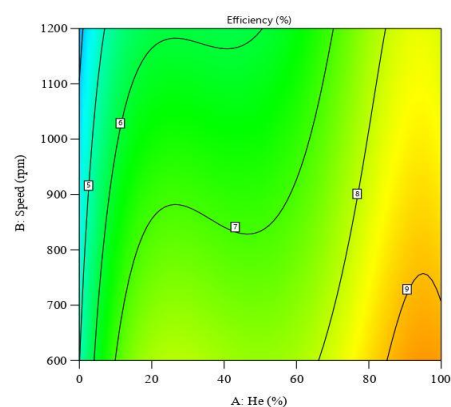


(الف)

شکل ۱۴ نمودار توان بر حسب متغیرهای ورودی مختلف: الف) هلیوم و سرعت و ب) تغییرات توان بر حسب تغییر فشار و دما

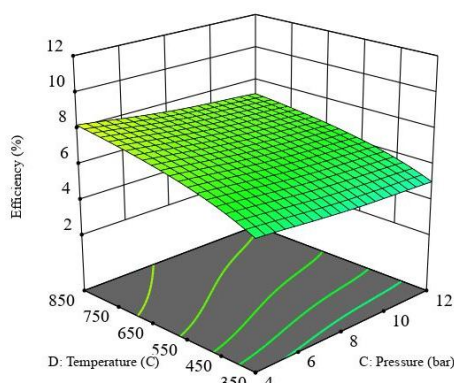


(ب)

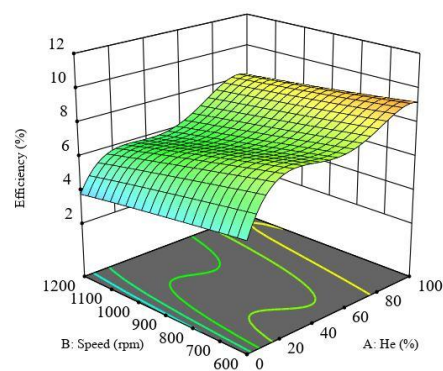


(الف)

شکل ۱۵ نقشه بازدهی بر حسب متغیرهای مختلف: (الف) بر حسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و (ب) بر حسب تغییر فشار و دما

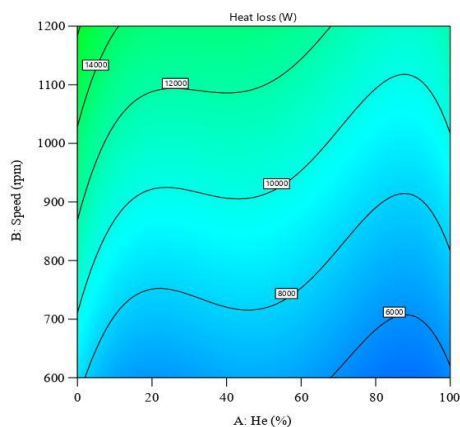


(ب)

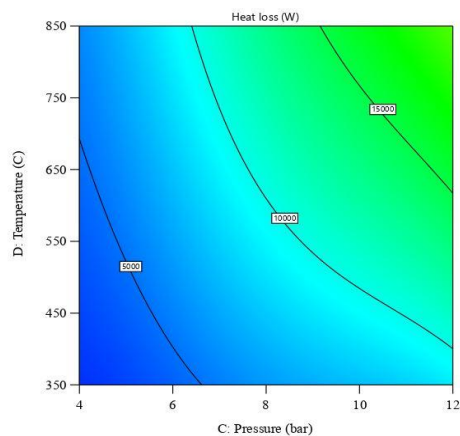


(الف)

شکل ۱۶ نمودار سه بعدی بازدهی بر حسب متغیرهای مختلف: (الف) تغییرات بازدهی بر حسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و (ب) تغییرات بازدهی بر حسب تغییر فشار و دما

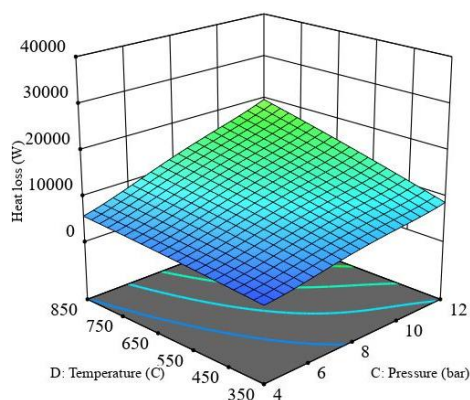


(ب)

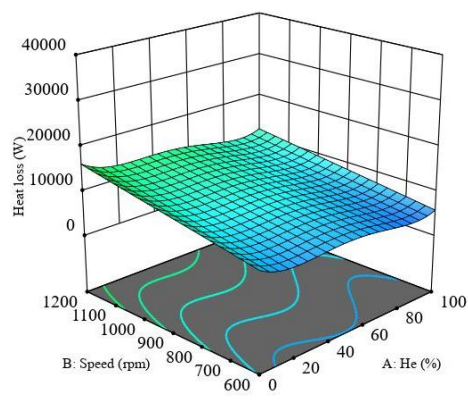


(الف)

شکل ۱۷ نقشه اتلاف حرارتی بر حسب متغیرهای ورودی: (الف) تغییرات اتلاف حرارتی بر حسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و (ب) تغییرات اتلاف حرارتی بر حسب تغییر فشار و دما

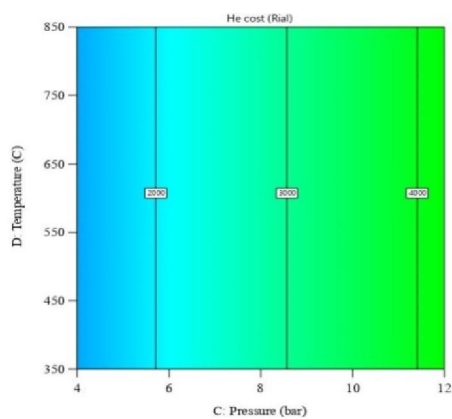


(ب)

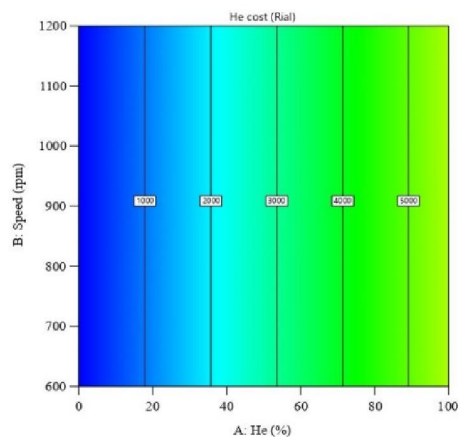


(الف)

شکل ۱۸ نمودار سه بعدی تلفات حرارتی بر حسب متغیرهای ورودی: (الف) تغییرات اتلاف حرارتی بر حسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و (ب) تغییرات اتلاف حرارتی بر حسب تغییر فشار و دما

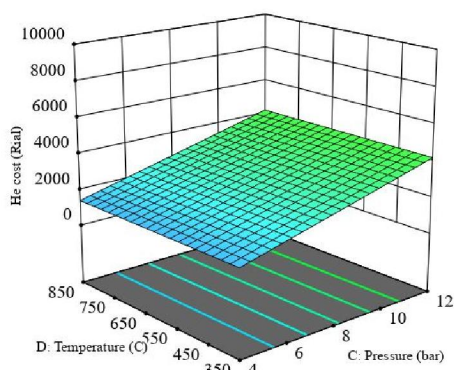


(ب)

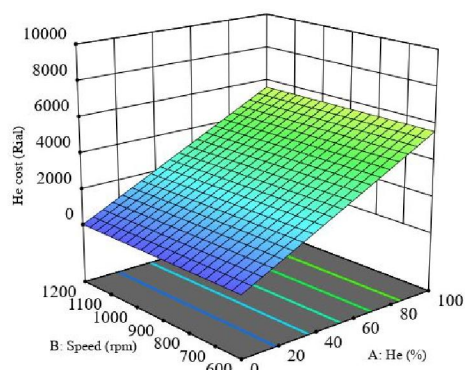


(الف)

شکل ۱۹ نقشه هزینه بر حسب متغیرهای ورودی: (الف) بر حسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و (ب) بر حسب تغییر فشار و دما



(ب)



(الف)

شکل ۲۰ نمودار سه بعدی هزینه بر حسب متغیرهای ورودی: (الف) بر حسب تغییر درصد هلیوم و سرعت و (ب) بر حسب تغییر فشار و دما

۵- نتیجه گیری

باتوجه به مطالعات انجام شده توسط سایر محققین مشخص شده است که اکثر آنها بر روی یک سیال عامل تمرکز داشته‌اند و مطالعه‌ای یافت نشده است که به بررسی ترکیب دو سیال عامل پردازند از طرفی به غیر از هوا که یک گاز رایگان است برای مابقی سیال عامل‌ها باید هزینه پرداخت شود از این رو محققین این مطالعه به عنوان نوآوری با استفاده از الگوی ترمودینامیکی غیرایده‌ال به ترکیب دوسیال عامل هوا و هلیوم پرداختند و در نهایت به بررسی تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی مختلف مانند دما، فشار، سرعت و درصد هلیوم بر روی توان، بازدهی، اتلاف حرارتی و هزینه با کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت پرداخته شده است در نهایت مشخص شد:

- با افزایش دما، فشار، سرعت و درصد هلیوم، توان بترتیب ۱۸۹ درصد، ۱۷۸ درصد، ۸۲ درصد و ۵۴ درصد افزایش می‌یابد که نشان دهنده آن است در توان دما بیشترین تأثیر را دارد.
- با افزایش دما، سرعت و فشار، بازدهی بترتیب ۴۲ درصد افزایش، ۳۳ درصد کاهش و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شده در بازه ۲۰ تا ۶۰ درصد از تغییرات هلیوم تغییرات بازدهی محسوس نیست ولی در حالت کلی از ۰ تا ۱۰۰ درصد بازدهی ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد.
- با افزایش دما، سرعت و فشار، اتلاف حرارتی بترتیب ۸۵ درصد، ۷۱ درصد و ۳۵۷ درصد افزایش خواهد داشت.
- هزینه فقط تابعی از درصد هلیوم و فشار تزریق گاز است همچنین باتوجه به شیب نمودارها مشخص شده است که تأثیر درصد هلیوم از فشار تزریق شده بیشتر است.
- مشخص شده است که مقدار بهینه درصد هلیوم برای توان، بازدهی و اتلاف حرارتی بترتیب ۲۰، ۳۲ و ۵۰ درصد است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) و از آقای مهندس علیزاده نیا، اعلام می‌دارند.

فهرست علائم

A	سطح مؤثر انتقال حرارت، m^2
A_{wg}	محیط تر شده شبکه فلزی بازیاب، m^2
C_p	حرارت مخصوص در فشار ثابت، kJ/kgK
C_v	حرارت مخصوص در حجم ثابت، kJ/kgK
ci	کسر جرمی جز نام
d	تغییرات نسبت به زاویه میل لنگ
d_h	قطر هیدرولیکی گرم کن، m
d_k	قطر هیدرولیکی کولر، m
d_r	قطر هیدرولیکی بازیاب، m
f	ضریب اصطکاک
f_r	فرکانس موتور، rps
G	دبی جرمی سیال عامل، kg/s
$h.$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، W/m^2K
k	ضریب انتقال حرارت هدایت، W/mK
L	ضخامت، m
l_h	طول گرم کن، m

l_k	طول کولر، m
l_r	طول بازیاب، m
M	جرم کل سیال عامل، kg
m	جرم سیال عامل قسمت‌های مختلف موتور، kg
p	فشار متوسط، Pa
Pr	عدد پراتل
Q	انتقال حرارت، J
R	ثابت جهانی گازها، kJ/kgK
r	شعاع، m
Re	عدد رینولدز
S	کورس، m
St	عدد استنتون
W_c	کار محفظه تراکم، J

علائم یونانی

γ	نرخ حرارت مخصوص
ε	اثر بازیاب
λ	نسبت شعاع میل‌لنگ به طول دسته سنبه
η	بازده
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s

زیرنویس‌ها

k	خنک کن
H	گرمکن
r	بازیاب

References

- [1] Hooshang M. Improvement of gas displacer control parameters in solar Stirling engine to increase performance, MSc thesis, Faculty of New Science and Technology, Iran, 2013. [In Persian]
- [2] Thimsen D. Stirling Engine Assessment, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Technical Report 2002;1007317.
- [3] García MT, Trujillo EC, Godiño JAV, Martínez DS. Thermodynamic model for performance analysis of a Stirling engine prototype. *Energies*. 2018;11. doi: 10.3390/en1102655
- [4] Topgül T, Okur M, Şahin F, Çınar C. Experimental investigation of the effects of hot-end and cold-end connection on the performance of a gamma type Stirling engine. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022;36. doi: 10.1016/j.jestch.2022.101152
- [5] Kim DJ, Park JS, Sim K. Development and performance measurements of a 2.5 kW-class free-piston stirling converter with detailed design and fabrication processes. *Energy Reports*. 2022;8,15011–15026. doi: 10.1016/j.egy.2022.11.046
- [6] Bataineh KM, Maqableh MF. A new numerical thermodynamic model for a beta-type Stirling engine with a rhombic drive. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022;28. doi: 10.1016/j.tsep.2021.101071
- [7] Yang HS, Cheng CH, Ali MA. Performance and operating modes of a thermal-lag Stirling engine with a flywheel. *Applied Thermal Engineering*. 2022;205. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118061
- [8] Thomas S, Barth EJ. Active Stirling Thermocompressor: Modelling and effects of controlled displacer motion profile on work output. *Applied Energy*. 2022;327. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120084

- [9] Sripakagorn A, Srikanth C. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Renewable Energy*. 2011;36:1728–1733. doi: 10.1016/j.renene.2010.12.010
- [10] Hooshang M, Askari Moghadam R, Alizadeh Nia S, Masouleh MT. Optimization of Stirling engine design parameters using neural networks. *Renewable Energy*. 2015;74:855–866. doi: 10.1016/j.renene.2014.09.012
- [11] Toghyani S, Kasaeian A, Hashemabadi SH, Salimi M. Multi-objective optimization of GPU3 Stirling engine using third order analysis. *Energy Conversion and Management*. 2014;87:521–529. doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.066
- [12] Ahmadi MH, Sayyaadi H, Dehghani S, Hosseinzade H. Designing a solar powered Stirling heat engine based on multiple criteria: Maximized thermal efficiency and power. *Energy Conversion and Management*. 2013;75:282–291. doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.025
- [13] Cheng CH, Yang HS. Optimization of geometrical parameters for Stirling engines based on theoretical analysis. *Applied Energy*. 2012;92:395–405. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.046
- [14] Patel V, Savsani V. Multi-objective optimization of a Stirling heat engine using TS-TLBO (tutorial training and self learning inspired teaching-learning based optimization) algorithm. *Energy*. 2016;95:528–541. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.030
- [15] Ahmadi MH, Hosseinzade H, Sayyaadi H, Mohammadi AH, Kimiaghani F. 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*. 2013;60:313–322. doi: 10.1016/j.renene.2013.05.005
- [16] Punathanam V, Kotecha P. Effective multi-objective optimization of Stirling engine systems. *Applied Thermal Engineering*. 2016;108:61–276. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.029
- [17] Hosseinzade H, Sayyaadi H. CAFS: The Combined Adiabatic-Finite Speed thermal model for simulation and optimization of Stirling engines. *Energy Conversion and Management*. 2015;91:32–53. doi: 10.1016/j.enconman.2014.11.049.
- [18] Hassanzadeh E, aliehyaei M, Jafari Mehrabadi S, Mohammadi A, Mazaheri H. Experimental investigation on the gamma model Stirling engine for cooling production using various gases. *The Journal of Engine Research*. 2020;59:17–28. [In Persian]
- [19] Vaziri B, Azadi M, Biglari M, Madani SN. Sensitivity analysis of dependency of working fluid thermo-dynamics properties to temperature on performance of Gama-type Stirling engine. *The Journal of Engine Research*. 2019;54:3–12. [In Persian]
- [20] Shufat SA, Kurt E, Cinar C, Aksoy F, Hançerlioğulları A, Solmaz H. Exploration of a Stirling engine and generator combination for air and helium media. *Applied Thermal Engineering*. 2019;150:738–749. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.053
- [21] Ahmed F, Zhu S, Yu G, Luo E. A potent numerical model coupled with multi-objective NSGA-II algorithm for the optimal design of Stirling engine. *Energy*. 2022;247. doi: 10.1016/j.energy.2022.123468
- [22] Yang HS, Aon Ali M, Venkata Ravi Teja K, Yen YF. Parametric study and design optimization of a kW-class beta-type Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*. 2022;215. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119010
- [23] Alfarawi S, Al-Dadah R, Mahmoud S. Enhanced thermodynamic modelling of a gamma-type Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:1380–1390. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.145.
- [24] Vaziri B, Azadi M, Biglari M, Madani SN. Performance study of helium-air hybrid Stirling engine under parameters effect of temperature , pressure , rotational speed and working fluid composition. *Applied Energy Conversion*. 2021;1. doi: 10.22077/aec.2021.4711.1007. [In Persian]
- [25] Ahmadi MH, Ahmadi MA, Pourfayaz F. Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;68:168–184, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.033.
- [26] Hosseinzade H, Sayyaadi H, Babaelahi M. A new closed-form analytical thermal model for simulating Stirling engines based on polytropic-finite speed thermodynamics. *Energy Conversion and Management*. 2015;90:395–408. doi: 10.1016/j.enconman.2014.11.043
- [27] Babaelahi M, Sayyaadi H. Analytical closed-form model for predicting the power and efficiency of Stirling engines based on a comprehensive numerical model and the genetic programming. *Energy*. 2016;98:324–339. doi: 10.1016/j.energy.2016.01.031
- [28] Sayyaadi H, Ghasemi H. A novel second-order thermal model of Stirling engines with consideration of losses due to the speed of the crack system. *Energy Conversion and*

- Management. 2018;505–521. doi: [10.1016/j.enconman.2018.05.021](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.021)
- [29] Babaelahi M, Sayyaadi H. Modified PSVL: A second order model for thermal simulation of Stirling engines based on convective-polytropic heat transfer of working spaces. Applied Thermal Engineering. 2015;85:340–355. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2015.03.018](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.018)
- [30] Ahadi F, Azadi M, Biglari M, Madani SN. Study of coating effects on the performance of Stirling engine by non-ideal adiabatic thermodynamics modeling. Energy Reports. 2021;7:3688–3702. doi: [10.1016/j.egy.2021.06.063](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.063)
- [31] Vaziri B. Optimization of working fluid type and combination percent in order to improve power and efficiency of Gamma Stirling Engine, MSc thesis, Semnan University, Iran, 2020. [In Persian]
- [32] Li R, Grosu L, Li W. New polytropic model to predict the performance of beta and gamma type Stirling engine. Energy. 2017;12862–76. doi: [10.1016/j.energy.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.001)
- [33] Cheng CH, Yang HS, Keong L. Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine. Energy. 2013;59:590–599. doi: [10.1016/j.energy.2013.06.060](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.060)