

Using Taguchi Method for Optimization of a Biogas-Fueled Gas Turbine-Based Cogeneration System

Mohsen Naderi¹, Mohammad Vajdi^{2*}, Mehran Abdolalipouradi³, Farzad Mohammadkhani⁴

¹M.Sc, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran Email Address: m.naderi@student.uma.ac.ir

² Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Correspondence: Email Address: vajdi@uma.ac.ir

³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. Email Address: m.abdolalipour@urmia.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of Technology, Urmia, Iran. Email Address: f.mohammadkhani@uut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 9 October 2025

Received in revised form: 22 November 2025

Accepted: 11 December 2025

Available online: 24 December 2025

Keywords:

Taguchi Method

Biogas-Fueled Gas Turbine

Cogeneration

Energy and Exergy Efficiency

ABSTRACT

This study presents the optimization of a biogas-fueled gas turbine-based cogeneration system using the Taguchi method for power generation, heating, freshwater production, and hydrogen production. Biogas is considered a suitable alternative to fossil fuels due to its renewability and environmental benefits. Thermodynamic and exergoeconomic analyses were performed using EES software to evaluate system performance. The objective is to improve system performance through adjustment of operational parameters using the Taguchi method. Taguchi experimental design was implemented using Python and an L27 orthogonal array to optimize five control parameters at three levels. Three target responses including energy efficiency, exergy efficiency, and specific cost of power generation were investigated. Results showed that gas turbine inlet temperature, with the greatest impact on responses, is the most critical optimization factor. Analysis of variance revealed that gas turbine temperature and air preheater temperature, with contributions of 47.61% and 36.23% respectively, were the most effective parameters on energy efficiency. Furthermore, changing the gas turbine temperature level from 1150 K to 1300 K results in a reduction of 4.2\$/GJ in the specific cost of power generation. The identified optimal conditions yield maximum energy efficiency of 83.72%, exergy efficiency of 35.07%, and minimum specific cost of power generation of 26.80 \$/GJ.

Cite this article: Naderi M, Vajdi M, Abdolalipouradi M, Mohammadkhani F. Using Taguchi Method for Optimization of a Biogas-Fueled Gas Turbine-Based Cogeneration System. Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics Year; 14(2):83-103. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.2.6.1>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights



Publisher: Imam Hossein University

استفاده از روش تا گوچی برای بهینه‌سازی یک سیستم تولید هم‌زمان بر مبنای توربین گازی با سوخت بیوگاز

محسن نادری^۱، محمد وجدی^{۲*}، مهران عبدالعلی پور عدل^۳، فرزاد محمدخانی

^۱ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. m.naderi@student.uma.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (نویسنده مسئول). vajdi@uma.ac.ir

^۳ استادیار، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور، دزفول، ایران m.abdolalipour@urmia.ac.ir

^۴ استادیار، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران. f.mohammadkhani@uut.ac.ir

چکیده

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

این مطالعه بهینه‌سازی سیستم تولید هم‌زمان مبتنی بر توربین گازی با سوخت بیوگاز را با روش تاگوچی برای تولید توان، گرمایش، آب شیرین و هیدروژن ارائه می‌دهد. بیوگاز به دلیل تجدید پذیری و مزایای زیست‌محیطی، جایگزین مناسب سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شود. تحلیل‌های ترمودینامیکی و اگزروزاکنومیکی با نرم‌افزار EES برای ارزیابی عملکرد سیستم انجام شد. هدف، بهبود عملکرد سیستم از طریق تنظیم پارامترهای عملیاتی با روش تاگوچی است. طراحی آزمایش تاگوچی توسط پایتون و آرایه متعامد L27 برای بهینه‌سازی پنج پارامتر کنترلی در سه سطح پیاده‌سازی شد. سه پاسخ هدف شامل بازده انرژی، بازده اگزرژی و هزینه ویژه تولید توان بررسی شد. نتایج نشان داد دمای ورودی توربین گاز با بیشترین تأثیر بر پاسخ‌ها، مهم‌ترین عامل کلیدی بهینه‌سازی است. تحلیل واریانس نشان داد دمای توربین گاز و دمای پیش گرم‌کننده هوا به ترتیب با سهم ۴۷٫۶۱٪ و ۳۶٫۲۳٪ مؤثرترین پارامترها بر بازده انرژی بودند. همچنین تغییر سطح دمای توربین گاز از ۱۱۵۰K به ۱۳۰۰K منجر به کاهش ۴٫۲ دلار بر گیگاژول هزینه ویژه تولید توان می‌شود. شرایط بهینه شناسایی شده، حداکثر به بازده انرژی ۸۳٫۷۲٪، بازده اگزرژی ۳۵٫۰۷٪ و حداقل هزینه ویژه تولید توان ۲۶۰۸۰ دلار بر گیگاژول را نتیجه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها:

روش تاگوچی

توربین گازی با سوخت بیوگاز

تولید هم‌زمان

بازده انرژی و اگزرژی

استناد: نادری، محسن، وجدی، محمد، عبدالعلی پور عدل، مهران، محمدخانی، فرزاد. مطالعه تجربی عملکرد یک سیستم

نمک‌زدایی تقطیر غشایی بافاصله هوایی در عدد رینولدز بسیار پایین (۱۴۰۴)؛ ۱۴ (۲): ۸۳-۱۰۳.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.2.6.1>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).



۱- مقدمه

استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر برای تولید انرژی پاک تر و کارآمدتر می تواند گامی مؤثر در جهت تحقق توسعه پایدار مبتنی بر انرژی باشد. فناوری های انرژی تجدید پذیر نه تنها منجر به کاهش انتشار دی اکسید کربن می شوند، بلکه مصرف آب نسبتاً پائینی نیز دارند، یکی از انواع انرژی های تجدید پذیر استفاده از زیست توده به عنوان سوخت است [۱-۴]. با توسعه کشورها، اهمیت افزایش تولید توان در جوامع بیش از پیش نمایان شده است [۵]. توربین های گازی به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در تولید توان نقش برجسته ای دارند. این توربین ها کاربردهای حیاتی در صنایع نفت و گاز، نیروگاه های برق و صنایع هوایی دارند [۶]. یکی از سوخت های مورد استفاده در محفظه احتراق توربین های گازی از نوع زیست توده است یکی از ویژگی های مهم زیست توده، امکان ذخیره سازی آسان آن است. علاوه بر این، زیست توده قابل تبدیل به انرژی الکتریکی، گرما و سوخت بوده و می تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار کربن ایفا کند. البته احتراق مستقیم این منبع معمولاً راندمان بالایی ندارد، اما با استفاده از روش های بیوشیمیایی و ترموشیمیایی، امکان تبدیل آن به سوخت های گازی فراهم می شود. [۷]. دو روش رایج در این حوزه، هضم بی هوازی و گازی سازی زیست توده هستند. در روش هضم بی هوازی، زیست توده در محیطی فاقد اکسیژن تجزیه می شود و طی این فرآیند بیوگاز تولید می شود که حدود ۴۰-۷۰ درصد آن از متان تشکیل شده است. [۸]. از سوی دیگر، فرآیند گازی سازی زیست توده با اکسیداسیون نسبی آن، منجر به تولید گاز سنتزی شامل ترکیباتی مانند هیدروژن و مونوکسید کربن می شود [۹]. ادغام بیوگاز در سامانه های انرژی از دیدگاه تحلیل انرژی و اکونومیک که ارزیابی های ترمودینامیکی و اقتصادی را برای بهینه سازی ترکیب می کند، در تحقیقات اخیر توجه زیادی جلب کرده است. مطالعات متعددی این تلاقی را بررسی کرده و پتانسیل بهبود کارایی و مقرون به صرفه بودن را برجسته کرده اند [۱۰]. لئو و همکاران [۱۱] روش جدیدی برای تولید هم زمان توان، آب شیرین، هیدروژن، آب گرم و سرد بررسی کردند. انرژی مورد نیاز از سیال زمین گرمایی و بیوگاز تأمین شده بود. در این روش از فرایند پس از احتراق برای جداسازی دی اکسید کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای استفاده شده بود. سامانه های

تولید هم زمان تولید توان و آب شیرین برای مجتمع های ورزشی توسط فن و سو [۱۲] بر مبنای انرژی استفاده شده از زیست توده پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی بهینه سازی چندهدفه، برای افزایش عملکرد کلی سیستم و به حداقل رساندن تأثیر زیست محیطی پیاده سازی شد. شبیه سازی های پایه، توان خروجی ۱۴۴۱ کیلووات را در کنار نرخ تولید آب شیرین ۱/۳۹۲ مترمکعب در ساعت نشان داد اما طبق نتایج بهینه سازی چندهدفه عملکرد سیستم به طور قابل توجهی بهبود یافته به طوری که راندمان انرژی به ۷۲/۱۳ درصد و راندمان انرژی به ۴۴/۹۲ درصد افزایش یافته و طبق شاخص انرژی-محیطی، کاهش بار زیست محیطی را نشان داد. عبدالعلی پور عدل و همکاران [۱۳] یک سیستم تولید هم زمان بر مبنای یک توربین گازی با سوخت بیوگاز پیشنهاد دادند که این سیستم پیشنهادی شامل توربین گازی با سوخت بیوگاز، الکتروایزر غشای تبادل پروتونی، آب شیرین کن با روش اسمز معکوس، چرخه ران کین (آلی) و آب گرم کن خانگی داخلی برای تولید توان، هیدروژن، آب شیرین و گرمایش است. این از نظر ترمودینامیکی و انرژی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند بر اساس نتایج، راندمان حرارتی ۶۲/۴۵ درصد، راندمان انرژی ۳۲/۵۲ درصد، هزینه جریحه زیست محیطی ۱/۹۳ دلار در ساعت و هزینه تولید توان واحد ۲۸/۹۸ دلار بر گیگا ژول برای سیستم به دست آمد.

روش تا گوچی^۱ بر بهبود کیفیت محصولات و فرآیندها از طریق طراحی آزمایش های کارآمد و کاهش تغییرپذیری تمرکز دارد از مزایای روش تا گوچی می توان به کاهش هزینه های آزمایش با بهینه سازی تعداد آزمون ها، بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان محصول، کاهش حساسیت فرآیند به عوامل غیرقابل کنترل نام برد [۱۴]. در حوزه مهندسی، روش تا گوچی به عنوان ابزاری کارآمد برای بهینه سازی شناخته می شود که با کاهش زمان، هزینه ها و تعداد آزمایش ها مورد بهره برداری قرار می گیرد. [۱۵]. همچنین تجزیه و تحلیل واریانس^۲ به عنوان یک روش قدرتمند می تواند تفاوت های آماری میان گروه ها را بررسی کرده و اهمیت نسبی پارامترهای مختلف را ارزیابی کند. شایان ذکر است در سامانه های ترمودینامیکی، استفاده از این دو روش می تواند به کاهش تخریب انرژی، افزایش کارایی و در نهایت بهینه سازی

1 Taguchi

2 ANOVA

آب شیرین کن اسمز معکوس (RO) یکپارچه شده است. در این تحقیق با به کارگیری روش طراحی آزمایش تا گوچی (آرایه متعامد L27) سعی بر شناسایی مهم ترین پارامترهای عملیاتی و تعیین سطوح بهینه آن ها جهت دستیابی به اهداف زیر است:

- بیشینه سازی بازده انرژی کل سیستم
- بیشینه سازی بازده انرژی کل سیستم
- کمینه سازی هزینه ویژه تولید توان

برای این منظور، تأثیر پنج پارامتر کلیدی شامل دمای پیش گرم کننده هوا (T_3)، دمای ورودی توربین گاز (T_4)، نسبت فشار کمپرسور (PR_{AC})، دمای او اپراتور (T_{ev}) و فشار کندانسور (P_{cond}) بر شاخص های عملکردی مذکور به صورت سیستماتیک تحلیل می گردد. در نهایت، با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، سهم هر یک از این پارامترها در تغییرات خروجی ها مشخص شده و شرایط عملیاتی بهینه برای هر یک از اهداف ارائه خواهد شد. تحلیل ترمودینامیکی سیکل پیشنهادی توسط نرم افزار EES و تحلیل واریانس و بهینه سازی با روش تا گوچی توسط کد پایتون صورت گرفته است.

۲- توصیف سیستم

دیباگرام شما تیک در شکل (۱)، چرخه تولید چندمنظوره توان، آب شیرین، گرما و هیدروژن با احتراق زیست توده را نشان می دهد. این چرخه به توربین گازی مبتنی بر سوخت بیوگاز متکی است. با توجه به دمای بالای محصولات احتراق در خروجی پیش گرمکن (جریان ۶) از این انرژی با مبدل های حرارتی برای بازیاب انرژی استفاده شده است. واحد اسمز معکوس برای تولید آب شیرین، الکترولایزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن، آب گرم کن داخلی برای تأمین حرارت و چرخه ران کین آلی برای تولید توان بیشتر به کار گرفته شده اند. جریان هوا پس از فشرده شدن در کمپرسور وارد پیش گرمکن شده و دمای آن افزایش می یابد. هوای گرم شده (جریان ۳) در محفظه احتراق با سوخت زیست توده ترکیب شده و فرآیند احتراق در فشار بالا انجام می گیرد. محصولات احتراق با دما و فشار بالا وارد توربین گازی شده و انرژی مکانیکی تولید می شود. گازهای خروجی از توربین (جریان ۵) با دمای بالا وارد پیش گرمکن شده تا انرژی باقی مانده برای گرم کردن هوای خروجی کمپرسور استفاده شود. گازهای خروجی پیش گرمکن (جریان ۶) به تبخیرکن چرخه ران کین

چرخه های مرتبط کمک کند [۱۷]. اوستاوغلو و همکاران [۱۸] از روش های تحلیل آماری، نظیر رویکردهای تا گوچی و تجزیه و تحلیل واریانس، برای بهینه سازی عملکرد چرخه تبرید آبشاری تراکم بخار استفاده کردند. هدف اصلی این مطالعه تعیین شرایط عملیاتی بهینه به منظور دستیابی به حداکثر ضریب عملکرد و بازده انرژی بود. نتایج حاصل نشان داد که با بهره گیری از این روش ها، بازده انرژی و ضریب عملکرد در حالت بهینه به ترتیب $37/6\%$ و $3/274\%$ درصد رسیده است. پژوهش جامعی در زمینه تحلیل انرژی و بهینه سازی چندهدفه چرخه های مختلف ران کین آلی توسط کوچوک و کیلیچ [۱۹] انجام گرفت. این تحقیق با بهره گیری از روش های تا گوچی و تحلیل واریانس صورت گرفته شده بود. یافته های مطالعه نشان دادند که چرخه ران کین آلی مجهز به مبدل حرارتی داخلی و گرم کن تغذیه، از منظر ترمودینامیکی و انرژی و اکونومیکی بهترین عملکرد را دارد. بر اساس نتایج بهینه سازی، راندمان حرارتی این سیستم برابر با $22/6\%$ درصد و راندمان انرژی معادل $73/5\%$ درصد برآورد شده است. همچنین هزینه تولید هر کیلووات ساعت توان $0/039$ دلار، دوره بازگشت سرمایه حدود $2/9$ سال و هزینه کلی سیستم به $1/06$ در ساعت محاسبه شده است. خلیل آریا و همکاران [۲۰] به بهینه سازی گازی ساز در سیستم ترکیبی تولید گرما و توان از زیاله های جامد شهری مربوط به خوابگاه های دانشجویی دانشگاه ارومیه با استفاده از روش تا گوچی و تحلیل واریانس برای بهبود عملکرد سیستم پرداختند. هدف اصلی پژوهش، بهینه سازی توان تولیدی بود که با بهره گیری از رویکرد تا گوچی صورت گرفت. توان بهینه محاسبه شده بر اساس سه عامل گازی ساز در سیستم شامل بخار $281/1$ کیلووات، هوا $279/4$ کیلووات و اکسیژن $266/9$ ارزیابی شده بود. نادری و همکاران [۲۱] به بهینه سازی یک چرخه ران کین آلی با منبع انرژی خورشیدی و زمین گرمایی به روش تا گوچی پرداختند، بررسی ها حاکی از آن بود که این سیستم، در شرایط بهینه، قادر است بازده قانون اول را تا 17% درصد نسبت به مقدار میانگین افزایش دهد.

هدف اصلی این پژوهش، ارائه و بهینه سازی یک سیستم تولید چندگانه (CCHP) مبتنی بر سیکل توربین گازی با سوخت بیوگاز است که با یک سیکل ران کین آلی (ORC) برای تولید توان بیشتر، یک چیلر جذبی برای تأمین سرمایش و یک واحد

۳- معادلات حاکم

۳-۱- تحلیل انرژی

برای توربین گازی توان تولیدی و بازده آیزنتروپیک به ترتیب طبق معادلات زیر نوشته می‌شوند [۲۳، ۲۲]:

$$\dot{W}_{GT} = \dot{n}_{prod}(\bar{h}_4 - \bar{h}_5) \quad (1)$$

$$\eta_{GT} = \frac{\bar{h}_4 - \bar{h}_5}{\bar{h}_4 - \bar{h}_{5s}} \quad (2)$$

برای کمپرسور توان تولیدی و بازده آیزنتروپیک به ترتیب طبق معادلات زیر نوشته می‌شوند [۲۳، ۲۲]:

$$\dot{W}_{AC} = \dot{n}_{air}(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) \quad (3)$$

$$\eta_{AC} = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_{2s}}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2} \quad (4)$$

برای پیش گرم‌کننده بقای انرژی می‌توان رابطه زیر را نوشت [۲۳، ۲۲]:

$$\dot{n}_{air}(\bar{h}_2 - \bar{h}_3) = \dot{n}_{prod}(\bar{h}_6 - \bar{h}_5) \quad (5)$$

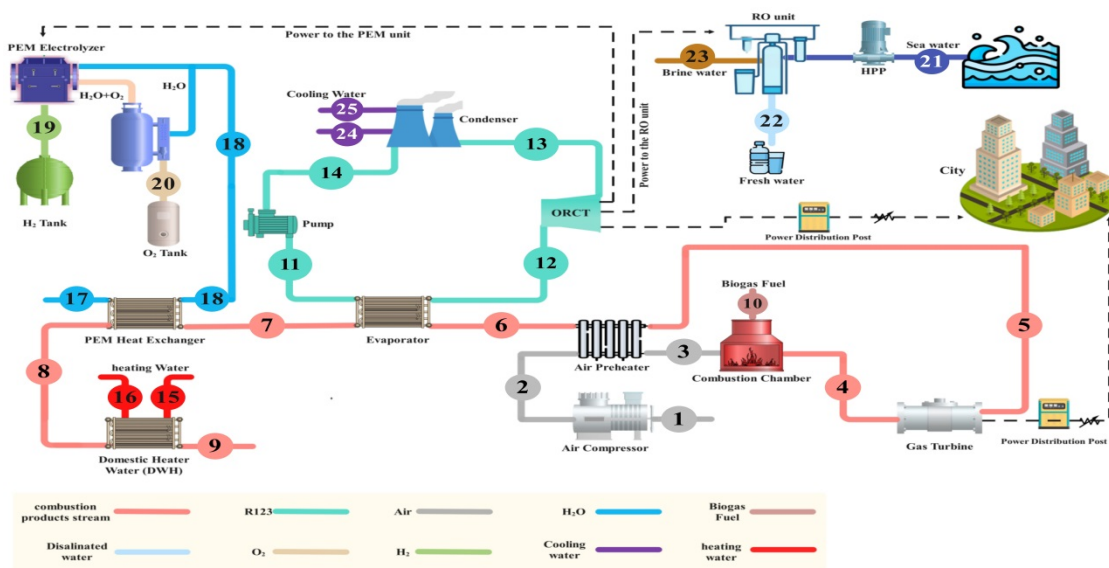
نسبت نرخ مولی سوخت به هوا ($\bar{\lambda}$) را می‌توان روابط زیر را نوشت [۲۳، ۲۲]:

$$\bar{\lambda} = \frac{\dot{n}_{fuel}}{\dot{n}_{air}} \rightarrow 1 + \bar{\lambda} = \frac{\dot{n}_{prod}}{\dot{n}_{air}} \quad (6)$$

که در رابطه بالا $\dot{n}_{air}$ نرخ مولی هوا، $\dot{n}_{prod}$ نرخ مولی محصولات احتراق و $\dot{n}_{fuel}$ نرخ مولی سوخت است.

معادله شیمیایی در محفظه احتراق به شرح زیر بیان می‌شود [۲۲، ۲۳]:

وارد شده تا از این حرارت برای تولید توان مورد نیاز سیستم اسمز معکوس و الکترولایزر بهره برد. سیال عامل آلی خروجی از تبخیرکن (جریان ۱۲) به دما و فشار بالای چرخه ران کین رسیده، سپس وارد توربین ران کین شده تا انرژی مکانیکی تولید کند. سیال عبوری از توربین (جریان ۱۳) به چگالنده منتقل شده و به حالت مایع اشباع (جریان ۱۴) تبدیل شده و توسط پمپ به فشار بالای چرخه ران کین می‌رسد. گازهای احتراق خروجی از تبخیرکن (جریان ۷) با دمای بالا وارد مبدل غشاء پروتونی می‌شوند تا دمای آب را برای فرآیند الکترولایزر (عموماً ۸۰ درجه سلسیوس) برسانند. الکترولایزر غشاء پروتونی هیدروژن و اکسیژن از آب تولید می‌کند. آب خروجی از الکترولایزر به دو جریان هیدروژن خالص خروجی از کاند و جریان مخلوط آب و اکسیژن خروجی از آند تقسیم می‌شود. برای تولید آب شیرین از سیستم اسمز معکوس استفاده شده است. پمپ فشار بالا انرژی لازم برای عبور آب شور از غشاء را فراهم می‌کند. توان لازم برای این پمپ توسط توربین چرخه ران کین تأمین می‌گردد. طی این فرآیند، آب شور هنگام عبور از واحد اسمز معکوس شوری خود را از دست داده و به آب شیرین تبدیل می‌شود. گازهای احتراق خروجی از مبدل حرارتی (جریان ۸) به آب گرم‌کن داخلی برای تأمین گرما منتقل شده‌اند. در نتیجه آب با دمای محیط (جریان ۱۵) به جریانی با دمای بالاتر (جریان ۱۶) تبدیل می‌شود.



شکل (۱): شماتیک سیستم تولید هم‌زمان مبتنی بر توربین گازی با سوخت بیوگاز

جدول (۱): معادلات مرتبط با الکترولایزر [۲۵، ۲۶]

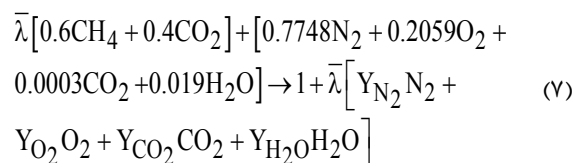
پارامتر	رابطه
نرخ جریان آب باقی مانده	$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F}$
نرخ جریان مولی اکسیژن	$\dot{N}_{O_2,out} = \frac{J}{4F}$
نرخ جریان مولی هیدروژن	$\dot{N}_{H_2,out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O,reacted}$
پتانسیل برگشت پذیر	$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{PEM} - 298)$
پتانسیل فعال سازی کاتد	$V_{act,c} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,c}} \right)$ $J_{0,c} = J_c^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,c}}{RT} \right)$
پتانسیل فعال سازی آند	$V_{act,a} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,a}} \right)$ $J_{0,a} = J_a^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,a}}{RT} \right)$
پتانسیل اهمیک	$V_{ohm} = JR_{PEM}, R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]}$ $\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c$ $\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \times \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$

۲-۳- تحلیل انرژی

تحلیل انرژی با شناسایی بازگشت ناپذیری های مکانیکی، حرارتی و شیمیایی، ناکارآمدی های ترمودینامیکی و از بین رفتن پتانسیل کار مفید سیستم را نشان می دهد. در سیکل توربین گاز، بیشترین تخریب انرژی در محفظه احتراق رخ می دهد، زیرا ترکیب هم زمان بازگشت ناپذیری های حرارتی و شیمیایی در آن بسیار شدید است.

جدول (۲): معادلات مرتبط با اسمز معکوس [۲۷]

پارامتر	رابطه
توان پمپ فشار بالا	$\dot{W}_{HPP} = \left(\frac{1000 \times M_f \times \Delta P}{3600 \times \eta_p \times \rho_f} \right)$
اختلاف فشار خالص	$\Delta P = \left(\frac{M_d}{3600 \times TCF \times FF \times A_e \times n_e \times n_v \times k_w} \right) + \Delta \Pi$
فشار اسمزی خالص	$\Delta \Pi = \Pi_{ave} - \Pi_d$
متوسط فشار در سمت تغذیه	$\Pi_{ave} = 0.5 \times (\Pi_b + \Pi_f)$
نفوذپذیری غشا	$k_w = \frac{6.48 \times 10^{-8} \times (18.6865 - 0.177 X_b)}{T}$
فاکتور اصلاح دما	$TCF = \exp \left\{ 2700 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right\}$
دبی آب شور	$M_b = M_f - M_d$
نسبت بازیابی	$RR = \frac{M_d}{M_f}$
نمک موجود در آب شور خروجی	$X_b = \frac{M_f \cdot X_f - M_d \cdot X_d}{M_b}$
نمک موجود در آب شیرین خروجی	$X_d = X_f (1 - SR)$
متوسط غلظت نمک	$X_{ave} = \frac{M_f \cdot X_f - M_b \cdot X_b}{M_b}$



شایان ذکر است که در واکنش احتراق کامل متان، تعداد کل مول ها ثابت باقی می ماند، که این امر منجر به برقراری رابطه $\dot{n}_{air} + \dot{n}_{fuel} = \dot{n}_{prod}$ در مدل حاضر می شود.

در معادله بالا کسر مولی دی اکسید کربن، آب، نیتروژن و اکسیژن با استفاده از تعادل به ترتیب طبق روابط زیر حاصل می شوند [۲۳، ۲۲]:

$$Y_{CO_2} = \frac{0.0003 + \bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \quad (8)$$

$$Y_{H_2O} = \frac{0.019 + 1.2\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \quad (9)$$

$$Y_{N_2} = \frac{0.7748N_2}{1 + \bar{\lambda}} \quad (10)$$

$$Y_{O_2} = \frac{0.2059 - 1.2\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \quad (11)$$

در محفظه احتراق معادله انرژی به شرح زیر بیان می شود [۲۳، ۲۲]:

$$-0.02\bar{\lambda}LHV + \bar{h}_{air} + \bar{\lambda}\bar{h}_{fuel} - (1 + \bar{\lambda})\bar{h}_{prod} = 0 \quad (12)$$

برای تبخیرکن قسمت ران کین با در نظر گرفتن اختلاف دمای نقطه پینچ از معادلات زیر استفاده می شوند [۲۵، ۲۴]:

$$T_{pp,ev} = T_{ev} + \Delta T_{pp,ev} \quad (13)$$

$$\dot{n}_6(\bar{h}_6 - \bar{h}_{pp}) = \dot{n}_{12}(\bar{h}_{12} - \bar{h}(T_{EV}, x=0)) \quad (14)$$

برای توربین ران کین آلی، توان تولیدی و بازده آیزنتروپیک به ترتیب طبق معادلات زیر نوشته می شوند [۲۵، ۲۴]:

$$\dot{W}_{ORCT} = \dot{n}_{12}(\bar{h}_{12} - \bar{h}_{13}) \quad (15)$$

$$\eta_{ORCT} = \frac{\bar{h}_{12} - \bar{h}_{13}}{\bar{h}_{12} - \bar{h}_{13S}} \quad (16)$$

برای پمپ ران کین آلی، توان مصرفی و بازده آیزنتروپیک به ترتیب طبق معادلات زیر نوشته می شوند [۲۵، ۲۴]:

$$\dot{W}_{ORCP} = \dot{n}_{14}(\bar{h}_{11} - \bar{h}_{14}) \quad (17)$$

$$\eta_{ORCP} = \frac{\bar{h}_{14} - \bar{h}_{11S}}{\bar{h}_{14} - \bar{h}_{11}} \quad (18)$$

در این پژوهش، معادلات مربوط به الکترولایزر غشاء پروتونی از جدول (۱) و برای واحد اسمز معکوس از جدول (۲) استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

می‌شود. همچنین N تعداد ساعات کارکرد سیستم، φ ضریب

نگهداری، Z_k هزینه خرید هر عضو سیستم در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): معادلات هزینه خرید تجهیزات برای سیستم تولید هم‌زمان

[۱۳]

معادله هزینه تجهیزات (\$)	جزء
$z_{AC} = (71.1 \dot{m}_a / (0.9 - \eta_{sc}) (P_2 / P_1) \ln(P_2 / P_1))$	کمپرسور هوا (AC)
$z_{AP} = 4122 \times (\dot{m}_g (h_5 - h_6) / U \Delta T_{lmd})^{0.6}$	پیش گرم کن هوا (AP)
$z_{CC} = ((46.08 \dot{m}_a / (0.995 - P_4 / P_3)) \cdot [1 + \exp(0.01874 - 26.4)])$	محفظه احتراق (CC)
$z_{GT} = ((479.34 \dot{m}_a / (0.92 - \eta_{sc})) \ln(P_4 / P_3) \cdot [1 + \exp(0.03674 - 54.4)])$	توربین گاز (GT)
$z_{EV} = 309.143(A_{EV}) + 231.915$	او اپراتور (EV)
$z_{ORCT} = 6000(\dot{W}_{ORCT})^{0.7}$	توربین ORC (ORCT)
$\dot{Z}_{cond} = 1773(\dot{m}_{ORC})$	کندانسور (Cond)
$z_{ORCP} = 3540(\dot{W}_{ORCP})^{0.71}$	پمپ ORC (ORCP)
$z_{HE} = 309.143(A_{HE}) + 231.915$	آب گرم کن (HE)
$z_{PEM} = 1000 \dot{E}_{electric}$	الکترولایزر (PEM)
$z_{RO} = n_e n_v C_k + n_v C_{pv}$	واحد اسمز معکوس (RO)
$z_{HPP} = 52(Q_{HPP} \times P_{HPP}), Q_{HPP} \leq 200 \text{ m}^3 / \text{hr}$ $z_{HPP} = 81(Q_{HPP} \times P_{HPP})^{0.96}, Q_{HPP} > 200 \text{ m}^3 / \text{hr}$	پمپ فشار بالا (HPP)

ضریب بازگشت سرمایه (CRF) از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$CRF = \frac{i_r (1 + i_r)^n}{(1 + i_r)^n - 1} \quad (25)$$

به‌طوری‌که i آهنگ بهره سرویس‌های مالی و n عمر سیستم است. ارتباط بین نرخ انرژی (E) و نرخ هزینه (C) و با استفاده از هزینه متوسط واحد انرژی (c)، طبق رابطه (۲۵) بیان می‌شود [۱۹]:

$$\dot{C}_k = c_k \dot{E}_k \quad (26)$$

همچنین پارامترهای اقتصادی مورد استفاده برای محاسبه CRF و نرخ هزینه سرمایه‌گذاری در جدول (۴) آورده شده است.

انرژی فیزیکی از معادله ۱۹ حاصل می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\dot{E}_{xph} = \dot{n} (\bar{h} - \bar{h}_0 - T_0 (\bar{s} - \bar{s}_0)) \quad (19)$$

که در رابطه ۱۹ زیروند ۰ مرتبط با شرایط محیط است، همچنین انرژی کل از معادله ۲۰ حاصل می‌شود [۲۳]:

$$\dot{E}_{x_{tot}} = \dot{E}_{x_{ph}} + \dot{E}_{x_{ch}} \quad (20)$$

در رابطه بالا $\dot{E}_{x_{ch}}$ مرتبط با انرژی شیمیایی جریان است، همچنین در رابطه بالا انرژی جنبشی و پتانسیل و دیفیوژن صفر در نظر گرفته شده است. انرژی شیمیایی $\dot{E}_{x_{ch}}$ که ناشی از اختلاف غلظت اجزای جریان با محیط مرجع است، برای مخلوط‌های گازی (مانند هوا، بیوگاز و محصولات احتراق) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$\dot{E}_{x_{ch,k}} = \dot{m} \left(\sum_i y_i \overline{ex}_i^{ch,0} + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i \right)_k \quad (21)$$

در رابطه فوق، y_i کسر مولی هر جزء و $\overline{ex}_i^{ch,0}$ انرژی شیمیایی استاندارد آن است.

مقدار تخریب انرژی از رابطه زیر حاصل می‌گردد [۲۳، ۳۰]:

$$\dot{E}_{x_D} = \dot{E}_{x_F} - \dot{E}_{x_P} \quad (22)$$

که در رابطه (۲۲)، $\dot{E}_{x_P}$ انرژی محصول و $\dot{E}_{x_F}$ انرژی سوخت می‌باشند.

۳-۳- تحلیل انرژی و اکونومیک

تحلیل انرژی و اکونومیک ترکیبی از ترمودینامیک و تحلیل اقتصادی است که در سامانه‌های انرژی به کار می‌رود [۳۱]. تعادل هزینه برای یک جریان طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{in,k} + \dot{Z}_k = \sum \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{w,k} \quad (23)$$

که در رابطه بالا $\dot{C}_{w,k}$ ، $\dot{C}_{q,k}$ ، $\dot{C}_{out,k}$ ، $\dot{C}_{in,k}$ به ترتیب مرتبط با هزینه جریان‌های انرژی ورودی، انرژی خروجی، انتقال حرارت و کار است. همچنین $\dot{Z}_k$ هزینه اولیه (هزینه‌هایی مرتبط با خرید تجهیزات، تعمیرات و نگهداری) است که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{Z}_k = \left(\frac{CRF \cdot \varphi}{N \times 3600} \right) Z_k \quad (24)$$

در رابطه بالا هزینه‌هایی را که برای خرید تجهیزات، تعمیرات و نگهداری آن‌ها مورد نیاز است تحت عنوان هزینه اولیه ($\dot{Z}_k$) بیان

همچنین هزینه تولید واحد طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$C_{P, total} = \sum_{i=1}^{n_p} C_{P_i} = \frac{\sum_{k=1}^{n_k} \dot{Z}_k + \sum_{i=1}^{n_f} \dot{C}_{f_i}}{\sum_{i=1}^{n_p} \dot{E}_{P_i}} \quad (29)$$

که $\dot{E}_{P_i}$ انرژی ورودی محصول و $\dot{C}_{f_i}$ هزینه سوخت است.

۳-۵- فرضیات

در این بررسی، از فرضیات زیر بهره گرفته شده است. [۲۲، ۲۳، ۲۵]:

- ✓ مخلوط گازها به صورت ایدئال و کارکرد اجزای به حالت پایا فرض شده است.
- ✓ سوخت زیست توده شامل ۴۰ درصد دی اکسید کربن ۶۰ درصد متان است.
- ✓ افت فشار در مبدل‌های توربین گازی ۵ درصد با و در محفظه احتراق ۴ درصد فرض شده است.
- ✓ اتلاف حرارت در محفظه احتراق به میزان ۲ درصد از ارزش حرارتی پایین سوخت تخمین زده می‌شود.
- ✓ برای قسمت ران کین سیال R123 در گرفته شده است.
- ✓ راندمان آیزنتروپیک توربین و پمپ ران کین به ترتیب ۸۵٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته شده است.
- ✓ در این بررسی پارامترهای ورودی مربوط به توربین گاز زیست توده، الکترو لایزر غشاء پروتونی و اسمز معکوس به ترتیب در جداول (۶) تا (۸) آورده شده است.
- ✓ توان خروجی خالص توربین گاز در تمام سناریوهای شبیه سازی شده معادل ۱ مگاوات ثابت در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به این توان ثابت، با تغییر پارامترهای طراحی، دبی جرمی هوا و سوخت به عنوان متغیرهای وابسته محاسبه می‌شوند.

جدول (۶): ورودی‌های توربین گاز زیست توده [۳۲]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۷۰۰	$T_3 (K)$	۱۰۰۰	$\dot{W}_{net,GT} (kW)$
۱۲۵۰	$T_4 (K)$	۸۶	$\eta_{ac} (\%)$
۲/۲۹۳	$T_0 (K)$	۸۶	$\eta_{gt} (\%)$
۱	$P_0 (bar)$	۱۰	$PR_{ac} (-)$

جدول (۴): داده‌های مفروض در شبیه سازی انرژی واکونومیک [۱۳]

نماد	پارامتر	مقدار
N	ساعات کارکرد سیستم در سال	۷۴۴۶
i	نرخ بهره (%)	۱۰
n	عمر سیستم (سال)	۲۰
φ	ضریب نگهداری (-)	۱۰۰۶

برای محاسبه هزینه هر جریان انرژی در سیستم، از اصل تراز هزینه استفاده می‌شود که بیان می‌کند: مجموع هزینه جریان‌های انرژی ورودی به یک جزء به همراه هزینه‌های سرمایه گذاری و نگهداری آن، برابر با مجموع هزینه جریان‌های انرژی خروجی است. معادلات این تراز برای اجزای اصلی سیستم در جدول ۵ آورده شده و با حل آن‌ها، نرخ هزینه (c) تمام جریان‌های سیستم به دست می‌آید.

جدول (۵): معادلات تراز هزینه برای اجزای سیستم [۱۳]

جزء	معادله تراز هزینه	معادله کمکی
AC	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{AC} = \dot{C}_2$	$c_{W,AC} = c_{W,GT}, c_1 = 0$
AP	$\dot{C}_2 + \dot{C}_5 + \dot{Z}_{AP} = \dot{C}_6 + \dot{C}_3$	$c_5 = c_6$
CC	$\dot{C}_3 + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{CC} = \dot{C}_4$	$\dot{C}_{10} = FP * LHV * \frac{mf}{10^6}$
GT	$\dot{C}_4 + \dot{Z}_{GT} = \dot{C}_5 + \dot{C}_{W,GT}$	$c_4 = c_5$
EV	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{EV} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_7$	$c_6 = c_7$
ORCT	$\dot{C}_{12} + \dot{Z}_{ORCT} = \dot{C}_{13} + \dot{C}_{W,ORCT}$	$c_{12} = c_{13}$
Cond	$\dot{C}_{24} + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{cond} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{25}$	$c_{14} = c_{13}, c_{24} = 0$
ORCP	$\dot{C}_{14} + \dot{Z}_{ORCP} + \dot{C}_{W,ORCP} = \dot{C}_{11}$	$c_{W,ORCP} = c_{W,ORCT}$
DWH	$\dot{C}_{15} + \dot{C}_8 + \dot{Z}_{DWH} = \dot{C}_{16} + \dot{C}_9$	$c_8 = c_9, c_{15} = 0$
HE	$\dot{C}_7 + \dot{C}_{17} + \dot{Z}_{HE} = \dot{C}_{18} + \dot{C}_8$	$c_7 = c_8, c_{17} = 0$
PEM	$\dot{C}_{18} + \dot{Z}_{PEM} + \dot{C}_{W,PEM} = \dot{C}_{19} + \dot{C}_{20}$	$c_{W,PEM} = c_{W,ORCT}$
RO	$\dot{C}_{21} + \dot{Z}_{HPP} + \dot{Z}_{RO} + \dot{C}_{W,RO} = \dot{C}_{22} + \dot{C}_{23}$	$c_{W,RO} = c_{W,ORCT}, c_{23} = c_{21} = 0$

۳-۴- تحلیل کلی سیستم

برای سیستم تولید همزمان مورد بررسی در این بررسی بازده انرژی و انرژی طبق دو رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{n}_{H_2} \overline{LHV}_{H_2} + \dot{Q}_{heating} + \dot{n}_{22} \overline{h}_{22}}{\dot{n}_{fuel} \overline{LHV}_{fuel}} \quad (27)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{x22} + \dot{E}_{x19} + \dot{E}_{xheating}}{\dot{n}_{fuel} \overline{ex}_{ch, fuel}} \quad (28)$$

جدول (۷): ورودی‌های قسمت الکترولایزر [۳۳]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۸۰	$T_{PEM} (^{\circ}C)$	۱	$P_0 (bar)$
۷۶	$E_{act,a} (kJ/mol)$	۵۰	$D (\mu m)$
۱۸	$E_{act,c} (kJ/mol)$	۹۶۴۸۶	$F (C/mol)$
۱۴	λ_a	۱۷۰۰۰۰	$J_a^{ref} (A/m^2)$
۱۰	λ_c	۴۶۰۰	$J_c^{ref} (A/m^2)$

جدول (۸): ورودی‌های قسمت اسمز معکوس [۳۳]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۴۸۵/۹	$M_f (m^3/hr)$	۰/۸۵	$FF (-)$
۴۵۰۰	$X_f (PPM)$	۴۰۳۵	$A_e (m^2)$
۰/۳	$RR (-)$	۲۵	$T_0 (^{\circ}C)$
۷	$n_e (-)$	۸۰	$\eta_{HPP} (\%)$
۴۲	$n_r (-)$	۲۵	$T_F (^{\circ}C)$

۴- طراحی آزمایش به روش تا گوچی

در مسائل پیچیده مهندسی و به‌ویژه درزمینه‌ی بهینه‌سازی فرآیندهای انرژی، شناسایی و ارزیابی متغیرهای مؤثر یکی از چالش‌برانگیزترین مراحل تحقیق است. برای کاهش هزینه‌ها و زمان آزمایش‌ها و نیز دستیابی به نتایج قابل‌اعتماد، استفاده از روش‌های مناسب طراحی آزمایش ضروری است. یکی از رویکردهای کاربردی و پرکاربرد در این حوزه، روش تا گوچی است که توسط ژنچی تا گوچی توسعه‌یافته و به‌خوبی می‌تواند با چالش‌های سامانه‌های چندمتغیره کنار بیاید. این روش بر پایه استفاده از آرایه‌های متعامد^۱ شکل گرفته است؛ به‌گونه‌ای که بدون نیاز به انجام تمام ترکیبات ممکن عوامل مؤثر، به بررسی مستقل هر یک از متغیرها می‌پردازد. این ویژگی، امکان انجام تعداد بسیار کمتری آزمایش را فراهم می‌کند، درحالی‌که همچنان اطلاعات کافی برای تحلیل اثرات اصلی متغیرها فراهم می‌شود. به‌عنوان مثال، در مورد یک مسئله با ۵ متغیر و هرکدام با ۳ سطح، به‌جای اجرای ۲۴۳ آزمایش کامل، تنها ۲۷ آزمایش لازم است.

یکی از ابزارهای کلیدی در روش تا گوچی، معیار نسبت سیگنال به نویز (S/N Ratio) است که به‌منظور ارزیابی ثبات

عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف محیطی به کار می‌رود. این معیار به سه دسته کلی تقسیم می‌شود: «بزرگ‌تر بهتر»، «کوچک‌تر بهتر» و «مقدار اسمی بهتر»، که انتخاب هرکدام به نوع خروجی مطلوب بستگی دارد. هدف اساسی این روش، یافتن ترکیبی از سطوح عوامل کنترلی است که ضمن نزدیک کردن پاسخ به مقدار مطلوب، واریانس ناشی از عوامل غیرقابل‌کنترل را نیز کاهش دهد [۳۴].

یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم این روش، تابع ضرر کیفیت است که از آن برای محاسبه هزینه انحراف از مقدار مطلوب استفاده می‌شود. این تابع به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا هزینه‌های ناشی از عدم دستیابی به عملکرد بهینه را به‌صورت کمی برآورد کند. علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌ها، یکی از مزایای قابل‌توجه روش تا گوچی، توانایی بالای آن در تشخیص اثرات اصلی متغیرها و تفکیک عوامل مؤثر از غیرمؤثر است. در کنار این روش، اغلب از تحلیل واریانس (ANOVA^۲) نیز استفاده می‌شود تا سهم هر یک از عوامل در تغییرات پاسخ تعیین شود. این امر به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و مبتنی بر داده کمک می‌کند. مقایسه این روش با سایر رویکردهای بهینه‌سازی مانند روش سطح پاسخ (RSM^۳) یا الگوریتم‌های هوشمند، برجسته‌کننده نقاط قوت روش تا گوچی از لحاظ سادگی در پیاده‌سازی و تفسیر نتایج است. البته باید توجه داشت که این روش بیشتر برای مسائلی که نیاز به تعیین متغیرهای مؤثر دارند و اثرات متقابل مرتبه بالا وجود ندارد، مناسب است. بااین‌حال، به دلیل کاربرپذیری بالا و الزامات محاسباتی پایین، روش تا گوچی انتخابی مناسب برای بهینه‌سازی اولیه سامانه‌های پیچیده به شمار می‌رود [۲۱، ۳۴، ۳۵].

۴-۱- الگوریتم حل و پیاده‌سازی روش تا گوچی

در این پژوهش، جهت بهینه‌سازی عملکرد یک چرخه تولید چندانگانه مبتنی بر توربین گازی با سوخت بیوگاز، از روش طراحی آزمایش تا گوچی استفاده شده است. فرآیند کلی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شامل چندین مرحله کلیدی است که با تعریف اهداف آغاز شده و با اجرای شبیه‌سازی‌ها و تحلیل نتایج به پایان می‌رسد. این رویکرد سیستماتیک، امکان شناسایی تأثیرگذارترین پارامترها و تعیین شرایط عملیاتی بهینه را فراهم می‌آورد. الگوریتم

^۲ Analysis of variance^۳ Response Surface Methodology^۱ Orthogonal Arrays

۴-۲- طرح ریزی آزمایش‌ها و تحلیل پاسخ‌ها

در چارچوب یک طراحی فاکتوریل کامل با در نظر گرفتن پنج متغیر مستقل در سه سطح، اجرای ۲۴۳ آزمایش برای پوشش تمامی ترکیبات ممکن ضروری است. باین‌حال، در این پژوهش از روش تا گویی بهره گرفته شده است که با به‌کارگیری آرایه متعامد L27، تعداد آزمایش‌ها را به ۲۷ مورد کاهش یافته است. این رویکرد ضمن حفظ قابلیت شناسایی اثرات اصلی متغیرها، منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در زمان و هزینه‌های انجام تحقیق می‌شود [۲۱].

جدول (۱۰) نحوه تنظیم آزمایش‌ها با استفاده از این آرایه را نشان می‌دهد. آرایه متعامد L27 به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتواند اثرات مستقل هر یک از پارامترهای ورودی را بدون تداخل زیاد با یکدیگر ارزیابی کند. بنابراین، طرح آزمایش‌ها به شکلی انجام گرفته که تمامی ترکیب‌های معنادار پارامترها پوشش داده شوند و امکان تحلیل جداگانه هر عامل فراهم شود. در این مطالعه، سه شاخص عملکردی به‌عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده‌اند: بازده انرژی (η_{th})، بازده اگزرژی (η_{ex}) و هزینه ویژه تولید توان (c_p). با توجه به نوع هر پاسخ، معیار مناسبی انتخاب شده است؛ به‌طوری‌که برای بازده‌های انرژی و اگزرژی از مدل «بزرگ‌تر بهتر» و برای هزینه ویژه تولید توان از مدل «کوچک‌تر بهتر» استفاده شده است.

جدول (۱۰): آزمایش‌ها تعیین شده بر اساس آرایه متعامد L27

شماره آزمایش	$T_3(K)$	$T_4(K)$	$PR_{AC} (-)$	$T_{ev}(K)$	$P_{cond} (bar)$
۱	۶۵۰	۱۱۵۰	۵	۳۵۰	۸/۰
۲	۶۵۰	۱۱۵۰	۵	۳۵۰	۲/۱
۳	۶۵۰	۱۱۵۰	۵	۳۵۰	۶/۱
۴	۶۵۰	۱۲۲۵	۱۰	۴۰۰	۸/۰
۵	۶۵۰	۱۲۲۵	۱۰	۴۰۰	۲/۱
۶	۶۵۰	۱۲۲۵	۱۰	۴۰۰	۶/۱
۷	۶۵۰	۱۳۰۰	۱۵	۴۵۰	۸/۰
۸	۶۵۰	۱۳۰۰	۱۵	۴۵۰	۲/۱
۹	۶۵۰	۱۳۰۰	۱۵	۴۵۰	۶/۱
۱۰	۷۰۰	۱۱۵۰	۱۰	۴۵۰	۸/۰
۱۱	۷۰۰	۱۱۵۰	۱۰	۴۵۰	۲/۱

گام به‌گام این فرآیند در شکل (۲) به‌صورت شما تیک نمایش داده شده است. مطابق با الگوریتم ارائه شده، اولین گام پس از تعریف اهداف، انتخاب متغیرهای کنترلی و سطوح آنهاست. در این راستا، پنج متغیر مستقل به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر عملکرد کلی سیستم انتخاب شدند: دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3)، دمای ورودی توربین گاز (T_4)، نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC})، دمای او اپراتور (T_{ev}) و همچنین فشار کندانسور (P_{cond}). برای هر یک از این متغیرها، سه سطح مختلف در نظر گرفته شد. انتخاب این سطوح بر اساس محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی سیستم و همچنین دانش موجود از مطالعات پیشین صورت گرفته است تا ضمن پوشش دادن محدوده عملیاتی قابل قبول، امکان تحلیل دقیق اثر هر پارامتر بر شاخص‌های عملکردی سیستم را فراهم کنند. مشخصات دقیق سطوح هر متغیر در جدول (۹) ارائه شده است.



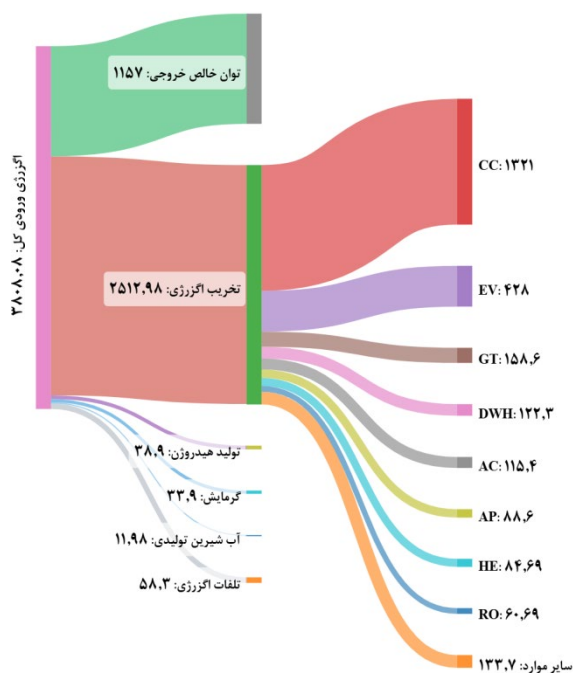
شکل (۱): فلوچارت فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از روش تا گویی

جدول (۹): سطوح تعیین شده برای پارامترهای مؤثر چرخه

پارامترها	سطوح هر پارامتر		
	۱	۲	۳
$T_3(K)$	۶۵۰	۷۰۰	۷۵۰
$T_4(K)$	۱۱۵۰	۱۲۲۵	۱۳۰۰
$PR_{AC}(-)$	۵	۱۰	۱۵
$T_{ev}(K)$	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰
$P_{cond}(bar)$	۰/۸	۱/۲	۱/۶

۵-۲- نتایج تحلیل تخریب و تلفات انرژی

نمودار سانکی شکل (۳)، توزیع انرژی ورودی کل سیستم (معادل ۳۸۰۸۰۰۸ kW) را بین محصولات مفید (توان خروجی، هیدروژن، گرمایش و آب شیرین)، تلفات انرژی و تخریب انرژی نشان می‌دهد.



شکل (۳): نمودار سانکی جریان و توازن انرژی برای سیستم تولید

هم‌زمان (بر حسب kW)

بر اساس این تحلیل، بخش عمده‌ای از انرژی ورودی (۳۸۰۸۰۰۸ kW) به دلیل بازگشت‌ناپذیری‌های ذاتی فرآیندهای داخلی مانند احتراق و انتقال حرارت تخریب می‌شود. علاوه بر این، مقدار ۵۸۰۳ kW از انرژی به صورت تلفات از طریق جریان‌های خروجی سیستم به محیط اطلاق می‌گردد. تحلیل دقیق‌تر منابع تخریب نشان می‌دهد که محفظه احتراق (CC) با سهم ۱۳۲۱ kW، بیش از ۵۲ درصد از کل تخریب انرژی سیستم را به خود اختصاص داده است. این امر، محفظه احتراق را به عنوان اصلی‌ترین کانون ناکارآمدی و همچنین بزرگ‌ترین پتانسیل برای بهبود عملکرد کلی سیستم معرفی می‌کند.

۵-۳- نتایج طراحی آزمایش

پس از اجرای ۲۷ سناریوی طراحی شده بر اساس آرایه متعامد L27، شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی سیستم مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار EES انجام شدند. در این مرحله، مقادیر عددی سه پاسخ کلیدی شامل بازده انرژی (η_{th})، بازده انرژی (η_{ex}) و

جدول (۱۰): آزمایش‌ها تعیین شده بر اساس آرایه متعامد L27

شماره آزمایش	$T_3(K)$	$T_4(K)$	$PR_{AC} (-)$	$T_{ev}(K)$	$P_{cond} (bar)$
۱۲	۷۰۰	۱۱۵۰	۱۰	۴۵۰	۶/۱
۱۳	۷۰۰	۱۲۲۵	۱۵	۳۵۰	۸/۰
۱۴	۷۰۰	۱۲۲۵	۱۵	۳۵۰	۲/۱
۱۵	۷۰۰	۱۲۲۵	۱۵	۳۵۰	۱۰/۶
۱۶	۷۰۰	۱۳۰۰	۵	۴۰۰	۸/۰
۱۷	۷۰۰	۱۳۰۰	۵	۴۰۰	۲/۱
۱۸	۷۰۰	۱۳۰۰	۵	۴۰۰	۶/۱
۱۹	۷۵۰	۱۱۵۰	۱۵	۴۰۰	۸/۰
۲۰	۷۵۰	۱۱۵۰	۱۵	۴۰۰	۲/۱
۲۱	۷۵۰	۱۱۵۰	۱۵	۴۰۰	۶/۱
۲۲	۷۵۰	۱۲۲۵	۵	۴۵۰	۸/۰
۲۳	۷۵۰	۱۲۲۵	۵	۴۵۰	۲/۱
۲۴	۷۵۰	۱۲۲۵	۵	۴۵۰	۶/۱
۲۵	۷۵۰	۱۳۰۰	۱۰	۳۵۰	۸/۰
۲۶	۷۵۰	۱۳۰۰	۱۰	۳۵۰	۲/۱
۲۷	۷۵۰	۱۳۰۰	۱۰	۳۵۰	۶/۱

۵-۴- نتایج

۵-۱- صحت‌سنجی

برای اطمینان از صحت مدل ارائه شده، اعتبارسنجی بخش تولید توان انجام شده است. در جدول (۱۱)، نتایج شبیه‌سازی حاضر با داده‌های مطالعه‌ی پیشین (حسینی و همکاران [۳۲]) مقایسه شده است. این تطابق نتایج نشان‌دهنده‌ی همخوانی مناسب مدل توسعه‌یافته است.

جدول (۱۱): اعتبارسنجی قسمت چرخه تولید توان

پارامتر عملکردی	کار حاضر	[۳۲]	خطا %
$\dot{W}_{GT} (kW)$	۲۳۹۷	۲۴۴۴	۱.۹۲%
$\dot{W}_{AC} (kW)$	۱۴۹۷	۱۴۴۴	۳.۶۷%
$\dot{W}_{net} (kW)$	۱۳۱۰	۱۳۰۸	۰.۱۵%
$\eta_{th} (\%)$	۴۰/۰۱	۳۹/۹۹	۰.۰۵%

۸	۶۷/۴۶	۹۸/۳۳	۱۴/۲۹
۹	۳۳/۴۶	۲۵/۳۳	۶۴/۲۹
۱۰	۰۵/۷۸	۹۷/۲۷	۲۹/۳۲
۱۱	۰۳/۷۸	۹۵/۲۷	۳/۳۲
۱۲	۰۲/۷۸	۹۴/۲۷	۳/۳۲
۱۳	۵۹/۵۷	۳۲/۲۹	۶۳/۳۲
۱۴	۰۸/۵۷	۷۶/۲۸	۰۸/۳۳
۱۵	۷۸/۵۶	۳۵/۲۸	۴/۳۳
۱۶	۴۷/۵۳	۹/۲۸	۷۳/۳۰
۱۷	۹۱/۵۲	۱۴/۲۸	۳۳/۳۱
۱۸	۵۹/۵۲	۶/۲۷	۷۸/۳۱
۱۹	۱۶/۷۶	۶۴/۲۸	۱۷/۳۴
۲۰	۰۷/۷۶	۵۷/۲۸	۲۲/۳۴
۲۱	۰۲/۷۶	۵۱/۲۸	۲۶/۳۴
۲۲	۴۲/۷۰	۰۶/۲۹	۳۵/۳۰
۲۳	۱۲/۷۰	۷۶/۲۸	۵۷/۳۰
۲۴	۹۴/۶۹	۵۴/۲۸	۷۳/۳۰
۲۵	۳۹/۵۸	۶۲/۳۲	۷۱/۲۸
۲۶	۸۸/۵۷	۰۸/۳۲	۰۲/۲۹
۲۷	۵۸/۵۷	۶۹/۳۱	۲۴/۲۹
میانگین	۳۴/۶۱	۱۵/۲۹	۷۶/۳۱

تحلیل دقیق این نمودار مشخص می‌کند که در بین پارامترهای بررسی‌شده، دمای ورودی توربین گاز (T_4) و دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) دارای بیشترین تأثیر بر بازده انرژی سیستم هستند. بررسی رفتار پارامتر T_4 نشان می‌دهد که با افزایش آن از سطح ۱ (۱۱۵۰ کلوین) به سطح ۳ (۱۳۰۰ کلوین)، بازده انرژی از ۶۹،۸۰٪ به ۵۲،۵۷٪ کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل فرض توان ثابت ۱ مگاوات رخ می‌دهد: با افزایش T_4 ، بازده سیکل برایتون افزایش‌یافته و برای حفظ توان ثابت، سیستم به دبی جرمی کمتری نیاز پیدا می‌کند. این کاهش دبی جرمی، علی‌رغم

هزینه ویژه تولید توان (c_p) به دست آمدند. تمامی نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۱۲) گردآوری شده‌اند. جدول یادشده علاوه بر ارائه داده‌های خام به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها، شامل محاسبات آماری مربوط به میانگین کلی هر یک از متغیرهای پاسخ نیز است. این میانگین‌ها نقش مهمی در درک کلی از رفتار سیستم در شرایط مختلف بازی می‌کنند و مبنایی قوی برای مقایسه عملکردی بین ترکیبات مختلف پارامترهای ورودی فراهم می‌کنند. همچنین، این اطلاعات در تحلیل‌های بعدی مانند محاسبه نسبت سیگنال به نویز (S/N Ratio) و تعیین سطوح بهینه پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جهت تحلیل نتایج حاصل از طراحی آزمایش، نمودارهای اثرات اصلی (Main Effects Plots) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این نمودارها، هر نقطه بیانگر میانگین یک تابع هدف در یکی از سطوح یک پارامتر مشخص است. این میانگین، از نتایج تمام آزمایش‌هایی محاسبه می‌شود که پارامتر مذکور در آن سطح خاص قرار داشته است. به این ترتیب، خط واصل بین نقاط میانگین برای یک پارامتر، تأثیر آن را بر تابع هدف نمایش می‌دهد؛ هرچه شیب این خط بیشتر باشد، تأثیر آن پارامتر قوی‌تر ارزیابی می‌شود.

۵-۴- تأثیر پارامترهای عملکردی بر بازده انرژی

شکل (۴)، نمودار اثرات اصلی پارامترهای کنترلی بر میانگین بازده انرژی سیستم ترکیبی را نمایش می‌دهد. این نمودار، الگویی از تعاملات پارامتری را در پیکربندی چندگانه مورد مطالعه آشکار می‌سازد.

جدول (۱۲): نتایج شبیه‌سازی بر اساس آزمایش‌های تعیین شده

شماره آزمایش	η_{th} (%)	η_{ex} (%)	c_p (\$/GJ)
۱	۷۲/۵۵	۶۲/۲۴	۸۳/۳۴
۲	۲۲/۵۵	۰۲/۲۴	۴۷/۳۵
۳	۹۲/۵۴	۵۹/۲۳	۹۴/۳۵
۴	۰۶/۵۸	۲۹/۳۰	۴۹/۳۰
۵	۵۳/۵۷	۶۶/۲۹	۹۶/۳۰
۶	۲۳/۵۷	۲۱/۲۹	۳/۳۱
۷	۳۱/۴۷	۰۱/۳۵	۴۶/۲۸

نسبت فشار، بازده ترمودینامیکی سیکل را بهبود می‌بخشد؛ از سوی دیگر، توان مصرفی کمپرسور برای دستیابی به فشارهای بالاتر به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. تا سطح ۲، اثر مثبت بر اثر منفی غلبه دارد و بازده کل افزایش می‌یابد. فراتر از این سطح، برای فشرده‌سازی هوا تا فشارهای بالاتر، کمپرسور نیازمند مصرف توان مکانیکی بسیار بیشتری است و منجر به کاهش بازده کل سیستم می‌شود. این پدیده، وجود یک نسبت فشار بهینه در سیکل‌های توربین گاز واقعی را به‌خوبی تبیین می‌کند. دمای او اپراتور (T_{ev}) نقش مهمی در عملکرد سیکل تبخیری ایفا می‌کند. مطابق شکل (۴)، در محدوده موردبررسی از ۳۵۰ تا ۴۵۰ کلوین، بیشترین بازده در سطح ۳ (۴۵۰ کلوین) با مقدار ۶۴٫۹۹٪ حاصل شده است. این نقطه بهینه، بیانگر تطابق حرارتی مناسب میان جریان گازهای داغ خروجی از توربین گاز و فرآیند تبخیر در او اپراتور است. در نهایت، فشار کندانسور (P_{cond}) در محدوده مورد مطالعه، کمترین تأثیر را بر بازده انرژی سیستم دارد. تغییرات این پارامتر از ۰٫۸۰ بار به ۱٫۶ بار، تنها تغییرات جزئی در بازده ایجاد می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که در پیکربندی فعلی سیستم، فشار کندانسور نقش تعیین‌کننده و حیاتی در بازده انرژی ندارد و لذا پارامترهای دیگر، اولویت بالاتری برای بهینه‌سازی دارا می‌باشند.

افزایش دمای گاز خروجی از توربین (T_3)، منجر به کاهش چشمگیر مقدار کل انرژی حرارتی قابل بازیافت برای زیرسیستم‌های پایین‌دستی یعنی سیکل ران کین آلی (ORC)، الکترولایزر و آب‌گرم‌کن داخل (DWH) می‌شود. از آنجایی که افت خروجی‌های مفید این بخش‌ها شدیدتر از کاهش مصرف سوخت است، بازده کلی انرژی سیستم کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش T_4 ، سیستم در تولید توان از توربین گاز کارآمدتر شده اما توانایی خود برای تولید هم‌زمان را از دست می‌دهد. در مقابل، پارامتر T_3 (دمای پیش گرم‌کننده هوا) الگویی کاملاً متضاد را به نمایش می‌گذارد. افزایش دمای پیش گرم‌کننده هوا از سطح ۱ (۶۵۰ کلوین) به سطح ۳ (۷۵۰ کلوین) منجر به بهبود قابل‌ملاحظه بازده انرژی از ۵۳٫۲۲٪ به ۶۸٫۰۶٪ می‌شود. دلیل این بهبود، کاهش نیاز به سوخت در محفظه احتراق است؛ چراکه هوا با دمای بالاتری وارد می‌شود و برای رسیدن به دمای ثابت ورودی توربین (T_4)، انرژی کمتری مورد نیاز است. با ثابت ماندن توان خروجی و سایر پارامترهای چرخه، این کاهش مصرف سوخت، بازده کلی سیستم را به‌طور مستقیم افزایش می‌دهد. نسبت فشار کمپرسور (PR_{AC}) تأثیری غیرخطی بر بازده انرژی دارد: با افزایش آن از سطح ۱ (۵) به سطح ۲ (۱۰)، بازده از ۵۹٫۴۸٪ به ۶۴٫۰۰٪ افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر به سطح ۳ (۱۵)، بازده به ۶۰٫۵۴٪ کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از یک توازن کلاسیک در سیکل برایتون است. از یک‌سو، افزایش



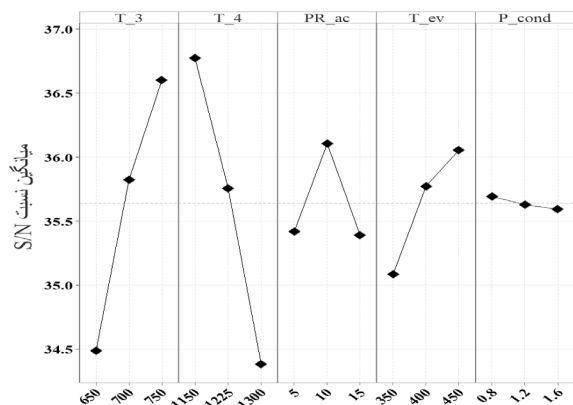
شکل (۴): مقادیر میانگین بازده انرژی سیکل بر اساس سطوح پارامترهای مؤثر

جدول (۱۳): نتایج ANOVA برای بازده انرژی

پارامتر	D F	SS	واریانس	P-Value	اهمیت
$T_3(K)$	۲	۱۰۱۷/۴۶	۷۳/۵۰۸	۰	۳۶,۲۳ %
$T_4(K)$	۲	۱۳۳۷/۳۳	۶۶۸/۶۶۷	۰	۴۷/۶۱ %
$PR_{AC}(-)$	۲	۸۹/۱۳۸	۴۴۶/۶۹	۰	۴/۹۴ %
$T_{ev}(K)$	۲	۷/۳۱۲	۳۵/۱۵۶	۰	۱۱/۱۳ %
$P_{cond}(bar)$	۲	۸۹/۱	۹۴۴/۰	۰	۰/۰۷ %
خطا	۱۶	۴۸/۰	۰۳/۰	۰	۰/۰۲ %
کل	۲۶	۲۸۰۸/۷۶			۱۰۰ %
R^2	۹۹۹۸/۰				

پس از بررسی تأثیر مستقیم هر پارامتر بر میانگین بازده انرژی، در این بخش از تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) مبتنی بر روش تا گوچی برای تعیین ترکیب بهینه پارامترها باهدف دستیابی به عملکرد پایدار و قوی استفاده می‌شود. هدف این تحلیل، یافتن شرایطی است که نه تنها بازده بالایی داشته باشد، بلکه نسبت به تغییرات ناخواسته نیز کمترین حساسیت را از خود نشان دهد.

شکل (۵) نمودار اثرات اصلی را برای نسبت سیگنال به نویز (S/N) با معیار "هرچه بزرگ‌تر بهتر" نمایش می‌دهد که برای یافتن پایدارترین شرایط عملکرد به کار می‌رود. بر اساس این نمودار، سطوحی که بیشترین مقدار S/N را دارند، به عنوان شرایط بهینه انتخاب شده است.



شکل (۵): نمودار اثرات اصلی پارامترها بر میانگین نسبت S/N برای

بازده انرژی

جدول (۱۳) نتایج تحلیل واریانس را برای پارامترهای مختلف عملیاتی در سیستم نشان می‌دهد. این تحلیل دقیقاً سهم هر پارامتر در تغییرپذیری بازده انرژی سیستم را مشخص می‌کند. بر اساس این تحلیل، دمای ورودی توربین گاز (T_4) به عنوان مهم‌ترین عامل شناخته شده است، که با سهم ۴۷,۶۱٪ نزدیک به نیمی از تغییرات مشاهده شده در بازده انرژی را توضیح می‌دهد. این نتیجه حائز اهمیت قابل توجهی است، زیرا نشان می‌دهد که مدیریت دقیق شرایط حرارتی ورودی توربین گاز نقش حیاتی در بهبود عملکرد کلی سیستم دارد. در رتبه دوم، دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) با سهم ۳۶,۲۳٪ قرار گرفته است. این پارامتر، به همراه پارامتر (T_4)، بیش از ۸۳٪ از واریانس کل بازده انرژی را توضیح می‌دهد، که اهمیت فوق‌العاده مدیریت حرارتی در بهینه‌سازی عملکرد سیستم ترکیبی را تأکید می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که شرایط حرارتی ورودی سیستم، عواملی بسیار مؤثر در تعیین بازده انرژی هستند. دمای اوپراتور T_{ev} با سهم ۱۱,۱۳٪ در رتبه سوم قرار گرفته است. این پارامتر تأثیر متوسطی بر بازده انرژی دارد، که منطبق با نقش آن در بهینه‌سازی فرآیند تبخیر و انتقال حرارت در بخش بازیافت انرژی است. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) در رتبه چهارم قرار گرفته است، با سهم ۴,۹۴٪. این پارامتر، هرچند تأثیر آماری کمتری نسبت به پارامترهای حرارتی دارد، اما معنادار است و نقش قابل توجهی در تعیین بازده کلی دارد. این نشان می‌دهد که مدیریت دقیق فشارها نیز در بهینه‌سازی عملکرد سیستم نقشی دارد. پارامتر P_{cond} با اهمیت ۰,۰۷٪ تأثیر قابل چشم‌پوشی بر بازده انرژی دارد. همچنین مقادیر P-value محاسبه شده برای تمامی پارامترها، کوچک‌تر از ۰,۰۰۵ است. این نشان می‌دهد که تأثیر این پارامترها بر بازده انرژی از لحاظ آماری معنادار است. اهمیت خطای باقی‌مانده در این تحلیل تنها ۰,۰۲٪ محاسبه شده است، که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل تا گوچی در پیش‌بینی و واریانس نتایج بازده انرژی است. در انتهای جدول نیز مقدار R^2 بالاتر از ۹۹ درصد نشانگر دقت بالای مدل در برازش است.

۵-۵- تأثیر پارامترهای عملکردی بر بازده انرژی

با در نظر گرفتن شکل (۶)، تحلیل نقشه حرارتی نشان می‌دهد که دمای ورودی توربین گاز (T_4) قوی‌ترین تأثیر را بر بازده انرژی سیستم دارد. با افزایش دما T_4 از سطح اول (۱۱۵۰ کلوین) به سطح سوم (۱۳۰۰ کلوین)، بازده انرژی از ۲۶٫۸۷٪ به ۳۱٫۴۷٪ افزایش می‌یابد. این بهبود به این دلیل است که افزایش دمای منبع گرم (گازهای ورودی به توربین)، طبق قانون دوم ترمودینامیک، عدم بازگشت‌ناپذیری (تخریب انرژی) در فرآیند احتراق و انتقال حرارت به سیکل را کاهش می‌دهد. بااینکه توان خالص سیکل ثابت است، اما کاهش تخریب انرژی در بخش دمابالای سیستم (محفظه احتراق و توربین) باعث بهبود بازده انرژی کل سیستم می‌شود. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) نیز تأثیر مثبت و قابل‌توجهی بر بازده انرژی دارد. با افزایش آن از سطح اول (۵) به سطح سوم (۱۵)، بازده انرژی از ۲۷٫۰۳٪ به ۳۰٫۴۹٪ بهبود می‌یابد.

این رفتار ناشی از رقابت دو اثر متضاد است: از یک‌سو، افزایش PR_{AC} دمای هوای خروجی از کمپرسور را بالا می‌برد و اختلاف دمایی در پیش‌گرم‌کننده را کاهش می‌دهد که منجر به کاهش تخریب انرژی در این بخش می‌شود؛ از سوی دیگر، کار موردنیاز کمپرسور برای دستیابی به فشارهای بالاتر افزایش یافته و به دلیل بازده محدود ایزنتروپیک، تلفات اصطکاکی و تخریب انرژی در خود کمپرسور را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در سطوح پایین‌تر (۱ به ۲)، اثر مثبت بر تخریب انرژی در بازیاب غالب است، اما در سطوح بالاتر (۲ به ۳)، افزایش سریع تلفات کمپرسور، بهبود انرژی را تقریباً خنثی می‌کند. این تعادل نشان می‌دهد که سیستم به یک نقطه بهینه انرژی نزدیک شده است، که فراتر از آن، افزایش نسبت فشار مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود.

دمای او اپراتور (T_{ev}) الگوی یکسانی نسبت به سایر پارامترها نشان می‌دهد. بالاترین بازده انرژی (۳۰٫۲۷٪) در سطح سوم (۴۵۰ کلوین) حاصل می‌شود. این رفتار به دلیل تعادل بین بهبود کیفیت بخار تولیدی در سیکل ران کین آلی و محدودیت‌های عملیاتی (مانند مقاومت مکانیکی مبدل‌های حرارتی) است. دمای

جدول (۱۴) ترکیب بهینه پارامترهای عملیاتی و ضرایب مشارکت هر یک را به‌منظور دستیابی به بیشینه بازده انرژی سیستم ترکیبی ارائه می‌کند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) روش تا گوچی، ترکیب پارامترهایی که منجر به حداکثر بازده انرژی خواهد شد مطابق سطوح ارائه‌شده در جدول (۱۴) است. انتخاب این سطوح برای پارامترها کاملاً منطبق بر روندهای مشاهده‌شده در شکل (۴) است.

جدول (۱۴): سطوح بهینه و ضرایب پارامترها برای بیشینه بازده انرژی

پارامتر	سطح	مقدار	ضریب مشارکت
$T_3(K)$	۳	۷۵۰	۶٫۷۲۷۸
$T_4(K)$	۱	۱۱۵۰	۸٫۴۶۴۴
$PR_{AC}(-)$	۲	۱۰	۳٫۱۹۳۳
$T_{ev}(K)$	۳	۴۵۰	۳٫۶۵۱۱
$P_{cond}(bar)$	۱	۰٫۸	۰٫۳۴۸۹
مجموع مشارکت		۲۲٫۳۸۵۵	
متوسط		۶۱٫۳۳۶۷	
خروجی بهینه پیش‌بینی شده		۸۳٫۷۲۲۲	

ضرایب مشارکت محاسبه‌شده نشان می‌دهد که دمای ورودی توربین گاز (T_4) با ضریب ۸٫۴۶۴۴ بیشترین سهم در بهبود بازده انرژی دارد. همچنین دمای پیش‌گرم‌کننده هوا (T_3) با ضریب مشارکت ۶٫۷۲۷۸ رتبه دوم را در بهبود بازده انرژی دارد، که این امر تأییدکننده اهمیت بالای این پارامتر در پیکربندی بهینه است.

بازده انرژی پیش‌بینی‌شده با اعمال این ترکیب بهینه برابر ۸۳٫۷۲۲۲٪ محاسبه‌شده است. این مقدار به‌طور چشمگیری بالاتر از میانگین بازده مشاهده‌شده در کل آزمایش‌ها (۶۱٫۳۳۶۷٪) است و نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه بهبود عملکرد سیستم از طریق تنظیم بهینه پارامترهای عملیاتی است. این نتیجه، کارآمدی بالای روش طراحی آزمایش تا گوچی را در تعیین شرایط بهینه عملکرد سامانه‌های ترکیبی پیچیده تأیید می‌کند و راهنمای مناسبی برای بهره‌برداری بهینه از این نوع سامانه‌ها فراهم می‌آورد.

جدول (۱۵): نتایج ANOVA برای بازده انرژی

پارامتر	D F	SS	واریانس	P-Value	اهمیت
$T_3(K)$	۲	۱۰,۴۶۱	۵,۲۳۰۵	۰	۵,۴۱٪
$T_4(K)$	۲	۹۵,۵۲۲	۴۷,۷۶۱	۰	۵۰,۰۰۹٪
$PR_{AC}(-)$	۲	۶۲,۲۶۴	۳۱,۱۳۲	۰	۳۲,۶۲٪
$T_{ev}(K)$	۲	۱۸,۱۶۸	۹,۰۸۳۹	۰	۹,۴۶٪
$P_{cond}(bar)$	۲	۳,۳۶۷	۱,۶۸۳۳	۰	۱,۶۹٪
خطا	۱۶	۱,۰۲۳	۰,۰۰۷۶۹	۰	۰,۰۷۳٪
کل	۲۶	۱۹۱,۰۰۱			۱۰۰٪
R^2			۰,۹۹۳۵		

دمای اواپراتور (T_{ev}) با سهم ۹,۴۶٪ تأثیر متوسط اما معناداری بر بازده انرژی نشان می‌دهد. دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) با سهم ۵,۴۱٪ تأثیر نسبتاً محدودی بر واریانس بازده انرژی دارد. این مشاهده در تضاد با تأثیر قابل توجه آن بر بازده انرژی است و نشان می‌دهد که پیش گرم کردن هوا اگرچه بر کمیت انرژی مؤثر است، اما تأثیر آن بر کیفیت انرژی (انرژی) محدودتر است. فشار کندانسور (P_{cond}) با سهم ۱,۶۹٪ کمترین تأثیر را بر بازده انرژی نشان می‌دهد که منطبق با نتایج نقشه حرارتی است. این پارامتر اگرچه بر عملکرد سیکل ران کین آلی تأثیر دارد، اما از منظر انرژی کل سیستم، نقش فرعی ایفا می‌کند. خطای باقی‌مانده تنها ۰,۰۷۳٪ از واریانس کل را تشکیل می‌دهد که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل تا کوچی در پیش‌بینی و توضیح تغییرات بازده انرژی است. همچنین مقدار $R^2 > 0.99$ بیانگر برازش بسیار خوب مدل رگرسیونی با داده‌های مشاهده‌شده است. به عبارت دیگر:

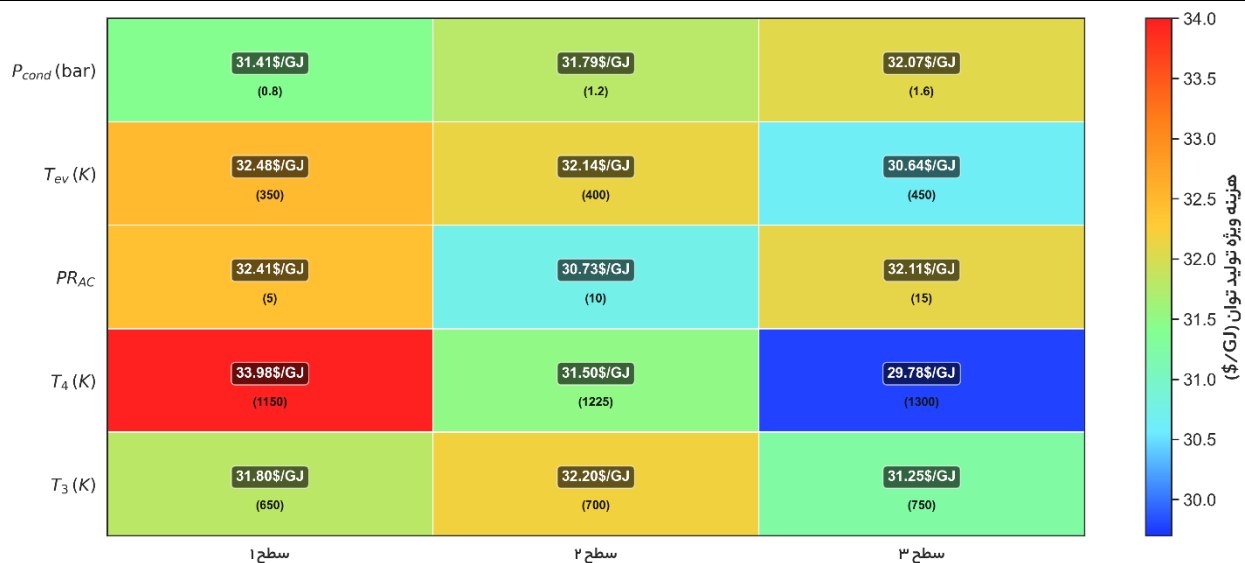
بیش از ۹۹ درصد از تغییرپذیری (واریانس) متغیر وابسته توسط مدل رگرسیونی (و متغیرهای مستقل آن) توضیح داده شده است.

شکل (۷) نمودار اثرات اصلی برای S/N بازده انرژی را با معیار «هرچه بزرگ‌تر بهتر» نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار سطوحی که بیشترین مقدار S/N را دارند به عنوان سطوح بهینه انتخاب می‌شوند.

بالتر اواپراتور باعث کاهش تلفات انرژی در فرآیند تبخیر می‌شود، اما افزایش بیش‌ازحد آن ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های مواد و کاهش ایمنی عملیاتی شود. دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) تأثیر نسبتاً محدود و با رفتار غیریکنواخت بر بازده انرژی دارد. تغییرات آن در محدوده ۶۵۰ تا ۷۵۰ کلوین باعث افزایش بازده از ۲۹,۲۹٪ به ۲۹,۸۳٪ می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که گرچه پیش گرم کردن هوا می‌تواند بازده انرژی را بهبود بخشد، اما از منظر کیفیت انرژی (که در تحلیل انرژی اولویت دارد)، تأثیر آن چندان قابل توجه نیست. این امر به دلیل این است که گرمای موردنیاز برای پیش گرم کردن هوا اغلب از منبعی با کیفیت پایین‌تر تأمین می‌شود. فشار کندانسور (P_{cond}) کمترین تأثیر را بر بازده انرژی دارد. تغییرات آن از ۰,۰۸ بار (سطح اول) به ۱,۰۶ بار (سطح سوم) منجر به کاهش جزئی بازده از ۲۹,۶۰٪ به ۲۸,۷۴٪ می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که شرایط عملیاتی کندانسور به عنوان یک منبع تلفات انرژی کم کیفیت، تأثیر محدودی بر بازده کلی انرژی سیستم دارد.

تحلیل واریانس (ANOVA) ارائه‌شده در جدول (۱۵) برای بازده انرژی، توزیع کمی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر تغییرپذیری عملکرد انرژی سیستم ترکیبی را به تفصیل نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این تحلیل الگوی متمایزی نسبت به بازده انرژی ارائه می‌کند که منعکس‌کننده ماهیت متفاوت مفهوم انرژی در ارزیابی عملکرد سامانه‌های انرژی است.

دمای ورودی توربین گاز (T_4) با سهم قابل توجه ۵۰,۰۰۹٪ به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر بر واریانس بازده انرژی شناسایی شده است. این یافته نشان‌دهنده نقش کلیدی دمای بالای ورودی توربین در بهبود کیفیت انرژی حرارتی و افزایش پتانسیل تولید کار مفید است. P-value صفر این پارامتر، معناداری آماری بالای آن را در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌کند. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) با سهم ۳۲,۶۳٪ در رتبه دوم قرار گرفته است که تقریباً یک سوم کل واریانس مشاهده‌شده را کنترل می‌کند. این پارامتر به دلیل تأثیر مستقیم بر بازده ترمودینامیکی سیکل برایتون و کاهش عدم برگشت‌پذیری‌های فشار سازی نقش بسزایی در تعیین عملکرد کلی انرژی سیستم دارد.



شکل (۷): مقادیر میانگین هزینه ویژه تولید توان سیکل بر اساس سطوح پارامترهای موثر

بهینه‌سازی باهدف دستیابی به حداکثر کارایی انرژی و بهره‌وری

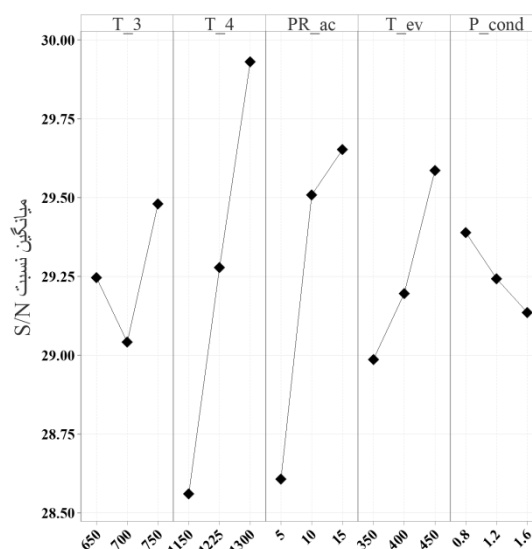
انرژی در سیستم چندمنظوره صورت گرفته است.

جدول (۱۶): سطوح بهینه و ضرایب پارامترها برای بیشینه بازده

انرژی

ضریب مشارکت	مقدار	سطح	پارامتر
۰,۶۸۰۷	۷۵۰	۳	T_3 (K)
۲,۳۲۵۲	۱۳۰۰	۳	T_4 (K)
۱,۳۳۸۵	۱۵	۳	PR_{AC} (-)
۱,۱۲۴۱	۴۵۰	۳	T_{ev} (K)
۰,۴۵۴۱	۰,۰۸	۱	P_{cond} (bar)
مجموع مشارکت			۵,۹۲۲۶
متوسط			۲۹,۱۴۹۳
خروجی بهینه پیش‌بینی‌شده			۳۵,۰۷۱۹

تحلیل ضرایب مشارکت نشان می‌دهد که دمای ورودی توربین گاز (T_4) با ضریب مشارکت ۲,۳۲۵۲ بیشترین سهم را در بهبود بازده انرژی دارد. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) با ضریب مشارکت ۱,۳۳۸۵ در رتبه دوم اهمیت قرار دارد. دمای اواپراتور با ضریب ۱,۱۲۴۱ تأثیر متوسطی بر بهینه‌سازی داشته و دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) با ضریب ۰,۶۸۰۷ نقش کمتری ایفا می‌کند. کمترین تأثیر متعلق به فشار کندانسور (P_{cond}) با ضریب ۰,۴۵۴۱ است.



شکل (۸): نمودار اثرات اصلی پارامترها بر میانگین نسبت S/N برای بازده انرژی

مطابق تحلیل نسبت سیگنال به نویز ترکیب پارامترهای بهینه برای بیشینه‌سازی بازده انرژی شامل: دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) در سطح ۳ با مقدار ۷۵۰ کلوین، دمای ورودی توربین گاز (T_4) در سطح ۳ با مقدار ۱۳۰۰ کلوین، نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) در سطح ۳ با مقدار ۱۵، دمای اواپراتور (T_{ev}) در سطح ۳ با مقدار ۴۵۰ کلوین و فشار کندانسور (P_{cond}) در سطح ۱ با مقدار ۰,۰۸ بار تعیین شده است.

جدول (۱۶) مشخصات بهینه‌سازی بازده انرژی سیستم ترکیبی را ارائه می‌دهد که بر اساس نتایج حاصل از روش تا گوچی و تحلیل ضرایب مشارکت هر پارامتر تدوین شده است. این

دقیق این پارامتر در مدیریت اقتصادی سیستم است. دمای اواپراتور (T_{ev}) با $۱۴,۴۹\%$ تأثیر در رده بعدی قرار دارد و اهمیت بهینه‌سازی سیکل ران کین آلی در عملکرد اقتصادی کلی را برجسته می‌کند. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) با $۱۲,۱۴\%$ سهم، تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه‌های عملیاتی دارد. دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) با $۳,۴۱\%$ اهمیت در تأثیرگذاری، اثر نسبتاً محدودی بر ساختار هزینه‌ای دارد، و این درحالی‌که است که فشار کندانسور (P_{cond}) با $۱,۵۹\%$ کمترین سهم را در تغییرات هزینه ویژه ایفا می‌کند.

همه پارامترهای موردبررسی P-value کمتر از ۰,۰۵ نشان می‌دهند که نشان‌دهنده معناداری آماری تأثیرات آن‌ها در سطح اطمینان ۹۵% است. جمع تأثیر پارامترها به $۹۹,۲۸\%$ می‌رسد و تنها $۰,۷۲\%$ به‌عنوان خطای مدل محاسبه‌شده که نشان‌دهنده دقت بالای طراحی آزمایش و قابلیت اعتماد نتایج است. مقدار $R^2=0.9930$ نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی داده‌ها و توانایی آن در توضیح ۹۹% از تغییرات متغیر وابسته است.

جدول (۱۷): نتایج ANOVA برای هزینه ویژه تولید توان

پارامتر	D F	SS	واریانس	P-Value	اهمیت
$T_3(K)$	۲	۴,۱۱۴	۲,۰۵۷	۰	$۳,۴۱\%$
$T_4(K)$	۲	۷۹,۹۴۵	۳۹,۹۷۲	۰	$۶۷,۶۵\%$
$PR_{AC}(-)$	۲	۱۴,۴۲۹	۷,۲۱۴۴	۰	$۱۲,۱۴\%$
$T_{ev}(K)$	۲	۱۷,۱۹۴	۸,۵۹۶۸	۰	$۱۴,۴۹\%$
$P_{cond}(bar)$	۲	۱,۹۷	۰,۹۸۴۸	۰	$۱,۵۹\%$
خطا	۱۶	۰,۷۵۷	۰,۰۴۷۳	۰	$۰,۷۲\%$
کل	۲۶	۱۱۸,۴۰۸			۱۰۰%
R^2					۰,۹۹۳۰

درنهایت، بهینه‌سازی هزینه ویژه تولید توان به‌عنوان یک شاخص کلیدی اقتصادی موردبررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، از تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) مبتنی بر روش تا گوچی استفاده می‌شود تا ترکیبی از پارامترها که منجر به کمترین و پایدارترین هزینه می‌شود، شناسایی گردد. از آنجاکه هدف، کمینه کردن هزینه است، از معیار کیفیت «هرچه کوچک‌تر بهتر» برای

مجموع مشارکت پارامترها برابر $۵,۹۲۲۶$ محاسبه‌شده است. متوسط بازده اگزورزی در آزمایش‌های انجام‌شده برابر $۲۹,۱۴۹۳\%$ بوده است که به‌عنوان مبنای مقایسه برای ارزیابی بهبود عملکرد در نظر گرفته‌شده است. پیش‌بینی مدل تا گوچی نشان می‌دهد که با اعمال این ترکیب بهینه، بازده اگزورزی سیستم به $۳۵,۰۷۱۹\%$ خواهد رسید. این مقدار نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه $۵,۹۲۲۶$ درصدی نسبت به متوسط عملکرد مشاهده‌شده در آزمایش‌ها است.

۵-۶- پارامترهای عملکردی بر هزینه ویژه تولید توان
مطابق شکل (۸)، نقشه حرارتی هزینه ویژه تولید توان تحلیل جامعی از تأثیرات متقابل پارامترهای عملیاتی بر شاخص‌های اقتصادی سیستم ترکیبی ارائه می‌دهد. این تحلیل امکان شناسایی مناطق بهینه عملکرد اقتصادی و درنهایت بهبود رقابت‌پذیری تجاری سیستم را فراهم می‌کند. برخلاف بهینه‌سازی بازده انرژی و اگزورزی که هدف حداکثر سازی است، در تحلیل هزینه ویژه هدف حداقل سازی این معیار برای دستیابی به کمترین هزینه تولید انرژی است.

تحلیل نقشه حرارتی نشان می‌دهد که دمای ورودی توربین گاز (T_4) بیشترین تأثیر را بر هزینه ویژه تولید توان دارد. کمترین هزینه در سطح ۳ (۱۳۰۰ کلوین) با مقدار $۲۹,۷۸۸$ دلار بر گیگا ژول مشاهده می‌شود که در مقایسه با سطح ۱ (۱۱۵۰ کلوین) با هزینه $۳۳,۹۸۸$ دلار بر گیگا ژول، کاهش $۴,۲$ دلاری را نشان می‌دهد. دمای اواپراتور (T_{ev}) نیز الگوی مشابهی را دنبال می‌کند، به‌طوری‌که سطح ۳ (۴۵۰ کلوین) با هزینه $۳۰,۶۴۶$ دلار بر گیگا ژول مطلوب‌ترین گزینه محسوب می‌شود. دمای بالاتر اواپراتور بازده سیکل ران کین آلی را بهبود داده و درنهایت هزینه واحد انرژی تولیدی را کاهش می‌دهد. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) در سطح ۲ (۱۰) کمترین هزینه ویژه را با مقدار $۳۰,۷۳۵$ دلار بر گیگا ژول ارائه می‌دهد. دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) در سطح ۳ (۷۵۰ کلوین) با هزینه $۳۱,۲۵۸$ دلار بر گیگا ژول بهترین عملکرد اقتصادی را نشان می‌دهد. پیش گرم هوا منجر به کاهش مصرف سوخت و بهبود بازده کلی سیستم می‌شود. و درنهایت فشار کندانسور (P_{cond}) کمترین حساسیت را نسبت به هزینه ویژه نشان می‌دهد، اما سطح ۱ ($۰,۰۸$ بار) با هزینه $۳۱,۴۱۸$ دلار بر گیگا ژول انتخاب مناسبی است.

در جدول (۱۷) نتایج تحلیل واریانس برای هزینه ویژه تولید توان را ارائه‌شده است و مسیر واضحی برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در حوزه اقتصادی را فراهم می‌کند. بر اساس نتایج ANOVA، دمای ورودی توربین گاز (T_4) با سهم $۶۷,۶۵\%$ از کل اثرات، موقعیت بی‌چالش رهبری در تعیین ساختار هزینه‌ای سیستم را دارد. این سهم غالب نشان‌دهنده نقش حیاتی کنترل

بهینه پیش‌بینی شده برابر ۲۶۰۸۰۵۶ دلار بر گیگا ژول است که نشان‌دهنده دستیابی به حداقل هزینه ممکن در شرایط عملیاتی تعریف شده است.

جدول (۱۸): سطوح بهینه و ضرایب پارامترها برای کمینه هزینه ویژه تولید توان

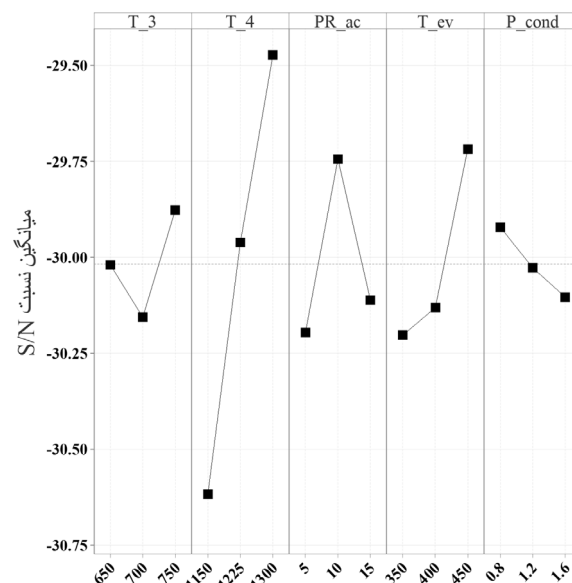
پارامتر	سطح	مقدار	ضریب مشارکت
$T_3(K)$	۳	۷۵۰	-۰,۵۰۱۱
$T_4(K)$	۳	۱۳۰۰	-۱,۹۷۰۰
$PR_{AC}(-)$	۲	۱۰	-۱,۰۱۸۹
$T_{ev}(K)$	۳	۴۵۰	-۱,۱۱۱۱
$P_{cond}(bar)$	۱	۰,۰۸	-۰,۳۴۶۷
مجموع مشارکت		-۴,۹۴۷۷	
متوسط		۳۱,۷۵۳۳	
خروجی بهینه پیش‌بینی شده		۲۶۰۸۰۵۶	

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم تولید هم‌زمان مبتنی بر توربین گازی با سوخت بیوگاز، باهدف هم‌زمان تولید توان الکتریکی، گرمایش، آب شیرین و هیدروژن، از دیدگاه‌های ترمودینامیکی و انرژی‌اقتصادی مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفت. برای این منظور، از روش طراحی آزمایش تا گنجی با آرایه متعامد L_{27} استفاده شد تا تأثیر پنج پارامتر کنترلی کلیدی شامل دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3)، دمای ورودی توربین گاز (T_4)، نسبت فشار کمپرسور (PR_{AC})، دمای اواپراتور (T_{ev}) و فشار کندانسور (P_{cond}) بر سه شاخص عملکردی اصلی سیستم، یعنی بازده انرژی، بازده انرژی و هزینه ویژه تولید توان، ارزیابی گردد.

بر اساس نتایج تحلیل واریانس (ANOVA)، دمای ورودی توربین گاز (T_4) به‌عنوان مؤثرترین پارامتر بر تمامی شاخص‌های مورد مطالعه شناسایی شد؛ به‌طوری‌که سهم آن در تغییرات بازده انرژی ۴۷,۶۱٪ و سهم دمای پیش گرم‌کننده هوا (T_3) ۳۶,۲۳٪ گزارش گردید. افزایش T_4 منجر به بهبود بازده انرژی و کاهش هزینه ویژه تولید توان شد، درحالی‌که افزایش T_3 با کاهش مصرف سوخت، تأثیر مثبتی بر بازده انرژی داشت. همچنین، رفتار غیرخطی نسبت فشار کمپرسور (PR_{AC}) نشان‌دهنده وجود یک

محاسبه نسبت S/N استفاده شده است. شکل (۹) نمودار اثرات اصلی را برای نسبت S/N هزینه ویژه تولید نمایش می‌دهد که مقدار بزرگ‌تر بهترین حالت است.



شکل (۹): نمودار اثرات اصلی پارامترها بر میانگین نسبت S/N برای هزینه ویژه تولید توان

جدول (۱۸) سطوح بهینه و ضرایب مشارکت پارامترهای مؤثر در حداقل سازی هزینه ویژه تولید توان را ارائه می‌دهد. این جدول که بر اساس نتایج تحلیل واریانس و نسبت S/N تدوین شده است، ترکیب بهینه پارامترهای عملیاتی را برای دستیابی به حداقل هزینه ویژه تولید توان مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که دمای ورودی توربین گاز (T_4) در سطح ۳ با مقدار ۱۳۰۰ کلوین و ضریب مشارکت ۱۰۹۷۰۰- بیشترین تأثیر مثبت بر کاهش هزینه ویژه تولید توان دارد. این مقدار منفی ضریب مشارکت نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه هزینه با افزایش دمای ورودی توربین است. همچنین دمای اواپراتور (T_{ev}) در سطح ۳ با مقدار ۴۵۰ کلوین و ضریب مشارکت ۱۰۱۱۱۱- در رتبه دوم تأثیرگذاری قرار دارد. نسبت فشار کمپرسور هوا (PR_{AC}) در سطح ۲ با مقدار ۱۰ و ضریب مشارکت ۱۰۰۱۸۹- نیز پایاپای دمای اواپراتور تأثیر زیادی بر کاهش هزینه‌ها دارد. و درنهایت دمای پیش گرم‌کننده هوا و فشار کندانسور تأثیر اندکی بر کاهش هزینه ویژه تولید توان دارند.

کاهش ۴,۹۴۷۷ دلار بر گیگا ژول در هزینه ویژه تولید توان، نشان می‌دهد که ترکیب بهینه این پارامترها قادر است هزینه ویژه تولید توان را تا میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. خروجی

- [6] Nekoonam A, Montazeri M. Thermodynamic Simulation of Fouling and Erosion in an Industrial Gas Turbine for Power Generation Applications. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023;19(4):53-69 (in persian). DOR :<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.4.5.6>
- [7] AlNouss A, McKay G, Al-Ansari T. Production of syngas via gasification using optimum blends of biomass. *Journal of Cleaner Production*. 2020;242:118499. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118499
- [8] Abbasi T, Tauseef S, Abbasi S. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012;16(5):3228-42. DOI 10.1016/j.rser.2012.02.046
- [9] Ahmad AA, Zawawi NA, Kasim FH, Inayat A, Khasri A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;53:1333-47. DOI 10.1016/j.rser.2015.09.030
- [10] Zahedi R, Ahmadi A, Dashti R. Energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analysis and optimization of quadruple combined solar, biogas, SRC and ORC cycles with methane system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;150:111420. DOI 10.1016/j.rser.2021.11142
- [11] Liu J, Hsu C-Y, Ahmad SF, Alotaibi MA, Allahham MI, Qin M. Design and energy, exergy, thermoeconomic, and exergo-environmental (4E) analyses of a novel hybrid geothermal/biogas-powered green multi-generation system using a post-combustion CO₂ capture unit. *Applied Energy*. 2025;377:124662. DOI 10.1016/j.apenergy.2024.124662
- [12] Fan L, Su Z. Simultaneous multi-objective optimization of a biogas-based power generation and brine desalination system for using in sport facilities. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025;69:105958. DOI 10.1016/j.csite.2025.105958
- [13] Abdolalipouradl M, Mohammadkhani F, Yari M. The potential of a novel multigeneration system based on a biogas-fueled gas turbine: Thermodynamic, exergoeconomic, and multi-objective assessments. *Renewable Energy*. 2025;123282. DOI 10.1016/j.renene.2025.123282
- [14] Roy RK. A primer on the Taguchi method: Society of manufacturing engineers; 2010.
- [15] Tsui K-L. An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design. *Iie Transactions*. 1992;24(5):44-57. DOI 10.1080/07408179208964244
- [16] Karna SK, Sahai R. An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*. 2012;1(1):1-7
- [17] Ustaoglu A, Kursuncu B, Kaya AM, Caliskan H. Analysis of vapor compression refrigeration cycle

نقطه بهینه بود که ناشی از تعادل میان بهبود بازده ترمودینامیکی و افزایش تلفات کمپرسور است.

با به کارگیری تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N)، شرایط عملیاتی بهینه برای هر یک از اهداف به صورت جداگانه تعیین شد. در این شرایط، حداکثر بازده انرژی ۸۳.۷۲٪، حداکثر بازده انرژی ۳۵.۰۷٪ و حداقل هزینه ویژه تولید توان ۲۶۰۸۰ دلار بر گیگا ژول به دست آمد. یافته‌ها کارایی روش تا گنجی را به عنوان یک ابزار آماری مؤثر در بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی چندمتغیره و پیچیده تأیید می‌کند. برای مطالعات آتی، به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری جهت انجام تحلیل چندهدفه، بررسی دقیق‌تر برهم‌کنش‌های پارامتری، و همچنین انجام تحلیل دینامیکی و ارزیابی چرخه عمر (LCA) پیشنهاد می‌شود تا چشم‌اندازی جامع‌تر از عملکرد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم فراهم گردد.

۷- مراجع

- [1] Kaur S, Kumar R, Singh K, Singh S. Systematic review of hydrogen, biomass, biogas, and solar photovoltaics in hybrid renewable energy systems: Advancements, challenges, and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;137:160-89. DOI 10.1016/j.ijhydene.2025.04.525
- [2] Mehdikhani V, Mirzaee I, Khalilian M, Abdolalipouradl M. Thermodynamic and exergoeconomic assessment of a new combined power, natural gas, and hydrogen system based on two geothermal wells. *Applied Thermal Engineering*. 2022;206:118116. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2022.118116
- [3] Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergoeconomic analysis of a novel integrated transcritical CO₂ and Kalina 11 cycles from Sabalan geothermal power plant. *Energy Conversion and Management*. 2019;195:420-35. DOI 10.1016/j.enconman.2019.05.027
- [4] Emamifar A. Exergoeconomic assessment of employing a regenerative dual organic flash cycle with an ORC in a geothermal power plant. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2024;13(2):55-66 (in persian). DOR :<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.5.3>
- [5] Abdolalipouradl M, Mohammadkhani F, Khalilarya S. A comparative analysis of novel combined flash-binary cycles for Sabalan geothermal wells: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints. *Energy*. 2020;209:118235. DOI 10.1016/j.energy.2020.118235

process: energy, exergy, and cost evaluations. *Renewable Energy*. 2010;35(11):2571-80

[28] Goudarzi A. Exergy Analysis of a Gas to Liquid Compact Heat Exchanger as an Intercooler for Various Working Conditions. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2020;16(3):85-98 (in persian).DOR :<https://dor.isc.ac/dor/dor:20.1001.1.26455323.1399.16.3.7.5>

[29] Moradi M, Bayati M. Performance Improvement of the Solar Heat Pump Using Carbon Nanotubes in the Refrigerant and its Condenser Structure. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2020;16(3):75-84 (in persian).DOR :<https://dor.isc.ac/dor/dor:%2020.1001.1.26455323.1399.16.3.6.4>

[30] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization: John Wiley & Sons; 1996.

[31] SABERI MA, Adibi T. Thermodynamic and Exergoeconomic Analysis and Optimization of a Standard Ammonia-Water Generator-Absorber Heat Exchange (GAX) Based Absorption Refrigeration Cycle. 2020

[32] Hosseini SE, Barzegaravval H, Wahid MA, Ganjehkaviri A, Sies MM. Thermodynamic assessment of integrated biogas-based micro-power generation system. *Energy conversion and management*. 2016;128:104-19.DOI 10.1016/j.enconman.2016.09.064

[33] Abdolalipouradl M, Mohammadkhani F, Khalilarya S, Yari M. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy. *Energy Conversion and Management*. 2020;226:113544.DOI 10.1016/j.enconman.2020.113544

[34] Mohammad Bagheri S, Naderi M, Vajdi M, Sadegh Moghanlou F, Tarlani Beris A. Numerical optimization of sample and die geometric parameters to increase the attainable temperature during spark plasma sintering of TiC ceramics. *Synthesis and Sintering*. 2023;3(4):213-25.DOI 10.53063/synsint.2023.34179

[35] Naderi M, Vajdi M, Abdolalipouradl M, Mohammadkhani F. Optimization using RSM of combined cycle of power, NG, and hydrogen production by a bi-geothermal energy resource and LNG heat sink. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025;74:106925.DOI 10.1016/j.csite.2025.106925

using advanced exergetic approach with Taguchi and ANOVA optimization and refrigerant selection with enviroeconomic concerns by TOPSIS analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;52:102182.DOI 10.1016/j.seta.2022.102182

[18] Ustaoglu A, Kursuncu B, Alptekin M, Gok MS. Performance optimization and parametric evaluation of the cascade vapor compression refrigeration cycle using Taguchi and ANOVA methods. *Applied Thermal Engineering*. 2020;180:115816.DOI 10.1016/j.applthermaleng.2020.115816

[19] Özdemir Küçük E, Kılıç M. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of ORC configurations via Taguchi-Grey Relational Methods. *Heliyon*. 2023;9(4):e15007.DOI 10.1016/j.heliyon.2023.e15007

[20] Khalilarya S, Chitsaz A, Mojaver P. Optimization of a combined heat and power system based gasification of municipal solid waste of Urmia University student dormitories via ANOVA and taguchi approaches. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(2):1815-27.DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.10.020

[21] Naderi M, Vajdi M, Moghanlou FS. Sensitivity Analysis of the Effective Parameters on the performance of a solar and geothermal driven ORC by Taguchi Method. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*. 2024;54(2):31-40 (in persian).DOI 10.22034/jmeut.2024.60069.3367

[22] Hosseini SE, Wahid MA. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;40:868-75

[23] Gholizadeh T, Vajdi M, Mohammadkhani F. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power generation systems fueled by biogas. *Energy conversion and management*. 2019;181:463-75.DOI 10.1016/j.enconman.2018.12.011

[24] Khalilarya S. Exergy analysis of a new proposal combined cycle from Sabalan geothermal source. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(4):11-22 (in persian).DOR :20.1001.1.10275940.1397.18.4.15.8

[25] Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Jafarmadar S. Energy and Exergy Analysis of a New Power, Heating, Oxygen and Hydrogen Cogeneration Cycle Based on the Sabalan Geothermal Wells. *International Journal of Engineering*. 2019;32(3):445-50

[26] Ni M, Leung MK, Leung DY. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy conversion and management*. 2008;49(10):2748-56.DOI 10.1016/j.enconman.2008.03.018

[27] Nafey A, Sharaf M. Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination