

آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر عملکرد چرخه رانکین آلی با منبع انرژی خورشیدی و زمین گرمایی به روش تاگوچی

محسن نادری

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، mohsen.n96@hotmail.com

محمد وجدی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، vajdi@uma.ac.ir

فرهاد صادق مغانلو*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، f_moghanlou@uma.ac.ir

چکیده

افزایش جمعیت جهانی و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، همراه با تغییرات محیطی ناشی از افزایش تقاضا برای انرژی تجدیدپذیر، موجب شده‌اند که تأمین پایدار، کافی و مقرون به صرفه این منابع به یکی از چالش‌های مهم موجود تبدیل شوند. مطالعه حاضر به بررسی چرخه تولید توان بر پایه انرژی زمین گرمایی و خورشیدی با هدف بهینه‌سازی عملیاتی، افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های تولید انرژی می‌پردازد. این مطالعه از نرم‌افزار EES برای تحلیل انرژی و انرژی-اقتصادی استفاده کرده و با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی به شناسایی حالت‌های بهینه عملیاتی پرداخته است. نتایج نشان می‌دهند که این سیستم تحت شرایط بهینه، می‌تواند بازده قانون اول را تا ۱۷٪ نسبت به مقدار میانگین افزایش و تخریب انرژی کل را تا ۵۰٪ نسبت به میانگین کاهش دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تیخیرکن متصل به گردآور خورشیدی و دمای چگالنده، اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار بر بازده قوانین اول و دوم، کاهش تخریب انرژی و نرخ هزینه تخریب انرژی هستند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل انرژی، تحلیل انرژی، چرخه رانکین آلی، روش تاگوچی، بهینه‌سازی، طراحی آزمایش.

Sensitivity Analysis of the Effective Parameters on the performance of a solar and geothermal driven ORC by Taguchi Method

M. Naderi
M. Vajdi
F. Sadegh Moghanlou

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

The global population increase and the depletion of fossil fuel reserves, along with environmental changes caused by the rising demand for renewable energy, have turned the sustainable, adequate, and cost-effective supply of these resources into a significant challenge. The current study examines the power generation cycle based on geothermal and solar energy, aiming to optimize operational procedures, increase efficiency, and reduce energy production costs. This study utilizes EES software for exergy and exergy-economic analysis and employs the Taguchi optimization method to identify optimal operational conditions. Results show that, under optimal conditions, this system can increase the first law efficiency by up to 17% compared to the average and reduce the total exergy destruction by up to 50%. Furthermore, the results indicate that the evaporator connected to the solar collector and the condenser temperature are the main factors affecting the efficiency of the first and second laws, reducing exergy destruction, and the cost rate of exergy destruction.

Keywords: Energy Analysis, Exergy Analysis, Organic Rankine Cycle, Taguchi Method, Optimization, Experimental Design.

برای مواجهه با چالش‌های انرژی پیش رو است [۳].

تأمین پایدار، کافی، و مقرون به صرفه انرژی‌های تجدیدپذیر یک چالش بزرگ برای آینده محسوب می‌شود [۴]. منابعی مانند انرژی خورشیدی و زمین گرمایی، به دلیل رسیدن به بلوغ فناوری، گسترش در بازار، فراوانی در تأمین انرژی پایدار بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسند [۵].

ادغام سیستم‌های انرژی خورشیدی و زمین گرمایی به طور کلی باعث استفاده مؤثرتر از منابع انرژی و بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم می‌شود [۶]. پژوهش ژو و همکاران [۷] نشان داد که سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-زمین گرمایی عملکرد بهتری نسبت به نیروگاه‌های مستقل دارند. آنها تأثیر دمای محیط، تابش خورشیدی، موقعیت جغرافیایی و کیفیت منابع را بر سیستم ترکیبی در شرایط

۱- مقدمه

افزایش جمعیت جهانی، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، و نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند تغییرات آب و هوا، به طور مشترک تقاضا برای منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر را افزایش داده‌اند [۱ و ۲]. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA^۱)، در صورتیکه روند فعلی مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی تا سال ۲۰۵۰ ادامه یابد، تقاضای جهانی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با سال ۲۰۱۱ به ترتیب ۷۰ و ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. این آمار بیانگر اهمیت فزاینده تحقیق و توسعه در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و راهکارهای نوآورانه

^۱ International Energy Agency

پایدار و ناپایدار بررسی کردند و دریافتند که خروجی توان خالص نیروگاه ترکیبی با افزایش تابش خورشیدی و دمای مخزن زمین گرمایی یا کاهش دمای محیط افزایش می‌یابد. لی و همکاران [۵] تحقیقاتی را در زمینه پیشرفت‌های صورت گرفته در نیروگاه‌های خورشیدی و زمین گرمایی با تمرکز بر فرصت‌های ادغام این دو سیستم انجام داده‌اند. مطالعه آنها بیان می‌کند که با وجود مزایای محیط‌زیستی و پایداری قابل توجه انرژی‌های تجدیدپذیر، مشکلاتی نظیر ضریب ظرفیت پایین و ناپایداری شبکه هنوز چالش‌هایی را ایجاد می‌کنند.

در پرتو نتایج موجود در مطالعات اخیر، از جمله پژوهش ژو و همکاران [۷]، که برتری و مزایای ادغام سیستم‌های انرژی خورشیدی و زمین گرمایی را مورد بررسی قرار داده‌اند، اهمیت فزاینده‌ای به یافتن رویکردهای ترمودینامیکی یا مهندسی کارآمد برای بهینه‌سازی استفاده از این منابع تجدیدپذیر داده می‌شود. در این زمینه، چرخه رانکین آلی (ORC^۱) به عنوان یک روش مطرح و مؤثر برای تولید انرژی از منابع متنوع گرمایی چون خورشیدی، زیست‌توده و زمین گرمایی معرفی شده است [۸]. این فناوری به خصوص در بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی اهمیت می‌یابد زیرا که به عنوان یک منبع کلیدی در گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته می‌شود. در این راستا، قاسمی و همکاران [۹] عملکرد یک سیستم سهموی خورشیدی با دمای پایین متصل به چرخه رانکین آلی را مورد بررسی قرار دادند و به نتیجه رسیدند که کارایی قانون دوم برای این سیستم ترکیبی ۳/۴٪ بیشتر از سیستم‌های جداگانه زمین گرمایی و خورشیدی است.

با این حال، هر منبع انرژی مزایا و معایب خاص خود را دارد، از این‌رو چندگانه‌سازی^۲ منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند ترکیب انرژی خورشیدی و زمین گرمایی، راهبردی مؤثر برای جبران نواقص یک سیستم با دیگری است [۵]. در همین راستا پژوهشگران در چندین مطالعه دیگر به بررسی پتانسیل ترکیبی از سیستم‌های انرژی خورشیدی و زمین گرمایی پرداخته‌اند. مطالعه انجام شده توسط چاکلیچی و همکاران [۶] نشان می‌دهد که ادغام یک چرخه رانکین آلی فوق‌بحرانی متکی بر انرژی زمین گرمایی و گردآورهای سهموی خورشیدی (PTSC^۳)، عملکرد ترمودینامیکی قابل توجهی را ارائه می‌کند. این مطالعه، کارایی الکتریکی و انرژی، تخریب انرژی کل و ظرفیت بهبود ارزیابی کرده است.

از سوی دیگر، نگرانی‌های رو به رشد در مورد استفاده مؤثر از منابع انرژی باعث شده است تا محققان به توسعه تکنیکی به نام انرژی-اقتصادی بپردازند که با ترکیب تحلیل انرژی با تحلیل هزینه سنتی، به بررسی جنبه‌های ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم‌های تبدیل انرژی می‌پردازد [۱۰ و ۱۱]. تحلیل‌های انرژی-اقتصادی به شناسایی هزینه در اجزای چرخه و تعیین هزینه واحد محصول کمک می‌کند که در بهینه‌سازی عملکرد سیستم بسیار مهم است [۳].

در سال ۲۰۱۳ محمدخانی و همکاران [۱۱] تحلیل انرژی-اقتصادی یک سیستم ترکیبی با خروجی الکتریکی ۲۹۹ مگاوات را ارائه کرده‌اند که در آن از گرمای ضایعاتی توربین گازی-راکتور هلیومی

ماژولار با استفاده از دو چرخه رانکین آلی استفاده می‌شود. عامل انرژی-اقتصادی کل سیستم ۳۷/۹۵٪، نرخ هزینه سرمایه \$/h ۶۸۷۶ و نرخ هزینه تخریب انرژی \$/h ۱۱۲۴۲ محاسبه شده است. الامام و دینجر [۱۲] به بررسی یک چرخه رانکین آلی مبتنی بر انرژی زمین گرمایی پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های انرژی و انرژی-اقتصادی، کارایی و هزینه‌های مرتبط با سیستم را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که کارایی انرژی و انرژی چرخه در شرایط بهینه به ترتیب ۱۶/۳۷٪ و ۴۸/۸٪ است، این تحقیق به ارزیابی جریان‌های جرمی سیال آلی، آب خنک‌کننده و آب زمین گرمایی برای تولید ۵ مگاوات برق خالص پرداخته است. کالیسه و همکاران [۱۳] یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی خورشیدی و زمین گرمایی را با شبیه‌سازی دینامیکی و تحلیل‌های انرژی و انرژی-اقتصادی معرفی کرده‌اند. این سیستم برای تأمین انرژی الکتریکی، گرمایی، خنک‌کننده و آب شیرین طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهند که کارایی انرژی کلی سیستم بین ۴۰٪ تا ۵۰٪ در حالت ارزیابی گرمایی و ۱۶٪ تا ۲۰٪ در حالت خنک‌کننده متغیر است.

در حالیکه مطالعات متعددی بر روی بهینه‌سازی چرخه‌های ترمودینامیکی انجام شده است، استفاده از تحلیل انرژی پیشرفته در کنار روش بهینه‌سازی تاگوچی و تحلیل واریانس ANOVA^۴ هنوز به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است [۱۴ و ۱۵]. این ترکیب می‌تواند با تعیین پتانسیل بهبود سیستم و ارزیابی تاثیر پارامترها و شرایط عملیاتی بهینه، مبنایی برای پیشبرد تحلیل انرژی فراهم آورد [۱۵].

روش تاگوچی با کاربرد وسیع در زمینه‌های مهندسی، بهینه‌سازی را با کاهش تعداد آزمایش‌ها، هزینه‌ها و زمان ممکن می‌سازد، ANOVA نیز ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل تفاوت‌های آماری بین گروه‌ها و تعیین اهمیت نسبی پارامترهای مختلف است [۱۶ و ۱۷]. کاربرد این دو روش در سیستم‌های ترمودینامیکی می‌تواند به بهینه‌سازی چرخه‌ها، افزایش کارایی و کاهش تخریب انرژی کمک کند [۱۴]. این روش‌ها در بهینه‌سازی سیستم‌های سرمایه‌ش، پمپ‌های گرمایی و مبادله‌کن‌های گرمایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با این حال، کاربرد آنها در سیستم‌های ترمودینامیکی نسبتاً محدود بوده است [۱۸ و ۱۹].

برخی از مطالعات، استفاده از روش‌های تاگوچی، ANOVA یا TOPSIS^۵ را برای بهینه‌سازی چرخه‌های ترمودینامیکی مانند چرخه رانکین آلی (ORC) به کار گرفته‌اند. به عنوان مثال اوزا و برت [۲۰] شرایط عملیاتی بهینه را برای بهبود COP^۶ و کارایی انرژی در یک سیستم تبرید جذبی NH₃-H₂O با استفاده از روش تاگوچی ارزیابی کردند. آن‌ها دمای جاذب و تبخیرکن را به عنوان مؤثرترین عوامل شناسایی کردند. اوستا اوغلو و همکاران [۲۱] بهینه‌سازی تاگوچی و ANOVA را برای ارزیابی یک چرخه تراکم بخار آبشاری انجام دادند تا شرایط ایده‌آل پارامترهای عملیاتی را برای بالاترین کارایی انرژی و

⁴ Analysis of variance

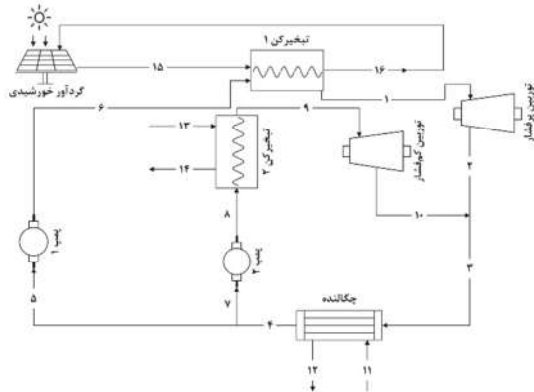
⁵ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

⁶ Coefficient of performance

¹ Organic Rankine cycle

² Hybridization

³ Parabolic Trough Solar Collector



شکل ۱- دیاگرام چرخه تولید توان پیشنهادی

برای یک جزء چرخه به عنوان یک حجم کنترل، موازنه نرخ انرژی بصورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$\sum \dot{E}_i + \sum \dot{Q}_{ev} \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{E}_e + \dot{E}_{Loss} + \dot{E}_D \quad (3)$$

که در رابطه فوق، $\sum \dot{E}_i$ و $\sum \dot{E}_e$ به ترتیب نشان دهنده نرخ کلی ورود و خروج انرژی از حجم کنترلی است. همچنین \dot{E}_D و \dot{E}_{Loss} به اتلاف انرژی و تخریب انرژی طی فرآیند اشاره می‌کنند. به علاوه، $\sum \dot{Q}_{ev} \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)$ به ترتیب نشانگر انرژی ناشی از انتقال گرما و کار است [۲۵].

برای هر جزء چرخه پیشنهادی، بازده قانون دوم (بازده انرژی) بصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\eta_{II, cycle} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} \quad (4)$$

همچنین برای کل چرخه نیز بازده قانون اول و بازده قانون دوم به ترتیب بصورت رابطه (۵) و (۶) تعریف می‌شود:

$$\eta_{I, cycle} = \frac{(\dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT}) - (\dot{W}_{pump1} + \dot{W}_{pump2})}{\dot{Q}_{in, coll} + \dot{Q}_{evap2}} \quad (5)$$

$$\eta_{II, cycle} = \frac{\dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT}}{\dot{E}_{F, coll} + \dot{E}_{F, evap2}} \quad (6)$$

۲-۲- معادلات حاکم بر تحلیل انرژی-اقتصادی

تحلیل انرژی-اقتصادی، که ترکیبی از تحلیل انرژی و اصول اقتصادی است برای به دست آوردن نتایج قابل استفاده‌تر و بهتر ارزیابی شده انجام می‌گیرد. نتایج تحلیل انرژی-اقتصادی را نمی‌توان به صورت جداگانه از تحلیل اقتصادی یا انرژی به دست آورد. برای هر جزء، جریان انرژی ورودی یا خروجی و نرخ هزینه انتقال گرما و کار همچنین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در نظر گرفته می‌شود و رابطه موازنه هزینه به شکل زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$\sum \dot{C}_{out, k} + \dot{C}_{W, k} = \sum \dot{C}_{in, k} + \dot{C}_{q, k} + \dot{Z}_k \quad (7)$$

$$\dot{C} = c \cdot \dot{E} \quad (8)$$

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N} \quad (9)$$

در روابط فوق \dot{C} نرخ هزینه بر حسب \$/h و c هزینه واحد انرژی بر حسب \$/GJ است. همچنین \dot{Z}_k نرخ هزینه برای جزء k است که

انرژی تعیین کنند. در تحقیق انجام شده، بیشترین COP و انرژی به ترتیب ۳/۲۷۴ و ۳۷/۶٪ بود.

بدم اوغلو و همکاران [۲۲] ارزیابی دیگری را برای چرخه ORC با استفاده از روش‌های تاگوچی و ANOVA انجام دادند. نتایج نشان داد که بازده گرمایی به شدت تحت تأثیر دمای تبخیرکن، دمای چگالنده، و بازدهی توربین بوده و دارای نسبت تأثیر کلی ۷۰٪ است.

پژوهش حاضر به بررسی یک چرخه رانکین آلی مبتنی بر انرژی زمین گرمایی و خورشیدی با هدف اصلی شناسایی شرایط بهینه عملیاتی، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی کلی سیستم می‌پردازد. تحلیل‌های انرژی، انرژی و انرژی-اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار EES^۱ و بهینه‌سازی چرخه بر اساس تغییر پارامترهای مختلف از طریق طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل ANOVA توسط نرم‌افزار Minitab انجام گرفته است. این رویکردها به شناسایی حالت‌های بهینه عملیاتی و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر کارایی و پایداری چرخه کمک کرده‌اند. این تحقیق با هدف کاهش هزینه‌های تولید انرژی و افزایش کارایی سیستم‌های ترمودینامیکی، در راستای بهبود بهره‌وری و توسعه پایدار در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، انجام گرفته است.

۲- معرفی سیستم پیشنهادی

شکل ۱ طرح کلی سیستم پیشنهادی تولید توان از منابع زمین گرمایی و خورشیدی را نشان می‌دهد. این سیستم از چرخه رانکین آلی با سیال عامل R123 برای تولید توان بهره می‌برد؛ این سیال یک سیال خشک بوده و دارای خواص زیست محیطی بسیار مناسبی می‌باشد [۲۳].

در این چرخه، آب تا ۱۵۰°C در گردآور خورشیدی گرم می‌شود و سپس جهت تولید بخار فوق گرم سیال آلی، در تبخیرکن ۱ بکار برده می‌شود. بخار فوق گرم وارد توربین پرفشار شده و توان تولید می‌کند. پس از خنک‌سازی، سیال آلی در چگالنده به مایع اشباع تبدیل شده و توسط پمپ ۱ به تبخیرکن ۱ بازمی‌گردد.

مطابق شکل ۱ در بخشی دیگر از چرخه، تبخیرکن ۲ با استفاده از آب گرم بدست آمده از منبع زمین گرمایی با دمای ۹۰°C بخار اشباع تولید کرده و در توربین کم فشار توان تولید می‌کند. همچنین تمامی دیگر فرضیات مسئله منطبق با شرایط قید شده در پژوهش وجودی و همکاران [۲۴] می‌باشد.

۱-۲- مدلسازی و تحلیل ترمودینامیکی

برای تحلیل ترمودینامیکی چرخه از قانون بقای جرم و قانون اول ترمودینامیک به ترتیب در معادلات (۱) و (۲) استفاده می‌شود. در حالت پایا معادلات حاکم به شرح زیر است:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e \quad (2)$$

معادلات بقای جرم و بقای انرژی مرتبط با هر جزء سیستم مطابق پژوهش وجودی و همکاران [۲۴] می‌باشد.

^۱ Engineering Equation Solver

توسط رابطه (۹) تعریف می‌شود. در رابطه (۹)، Z_k هزینه اولیه جزء k ، N ساعت‌های کارکرد سالیانه که ۷۰۰۰ ساعت منظور شده [۲۴]، φ ضریب نگهداری که برابر با ۱/۰۶ در نظر گرفته شده، و CRF ضریب بازگشت سرمایه است که بصورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۲۴]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

که در آن n و i به ترتیب عمر مفید چرخه برابر ۲۰ سال و نرخ سود برابر با ۱۲٪ است [۲۴].

۳-۲- گردآور خورشیدی

برای تحلیل گردآور خورشیدی و محاسبات آن، تماما از پژوهش وجدی و همکاران [۲۴] استفاده شده است.

۳- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

در مواجهه با طراحی آزمایش‌هایی که شامل تعداد بالایی از پارامترها با سطوح متفاوت می‌شوند، پژوهشگران با چالش‌هایی در یافتن بهترین عملکرد و حالت بهینه روبرو می‌گردند. روش تاگوچی، ابداً از ژنیچی تاگوچی، به دلیل کارآمدی در کاهش تعداد آزمایش‌ها، کاهش هزینه‌ها و زمان، و ارائه تحلیل‌های آماری قوی برای تحقیق پیش‌رو انتخاب شده است. این روش با استفاده از آرایه‌های متعامد، امکان ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف را با تعداد آزمایش‌های کمتر فراهم می‌کند و نتایج بهتری در بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد.

یکی از مفاهیم مهم در این روش، نسبت سیگنال به نویز (S/N) است که برای ارزیابی عملکرد فرآیندها استفاده می‌شود. نسبت S/N به سه دسته اصلی تقسیم می‌شود: "بزرگتر بهتر"، "کوچکتر بهتر"، و "مقدار اسمی بهتر". این نسبت‌ها به تعیین میزان انحراف از عملکرد مطلوب کمک می‌کنند و فرآیند بهینه‌سازی را هدایت می‌کنند. همچنین، تابع ضرر تاگوچی برای محاسبه هزینه‌های ناشی از انحرافات از عملکرد مطلوب به کار می‌رود. هدف اصلی این روش، به حداقل رساندن واریانس و بهبود کیفیت خروجی‌ها با کاهش حساسیت به عوامل محیطی و غیرقابل کنترل است [۱۵].

این روش، که کاربرپسند نیز می‌باشد، با استفاده از روش‌های پردازش داده‌های آماری، امکان استخراج نتایج قابل توجه از داده‌های محدود را فراهم می‌آورد، و کمک می‌کند تا نقش و اهمیت پارامترها در نتایج خروجی روشن شود و پیش‌بینی حالت بهینه به گونه‌ای است که کارایی پارامتر خروجی به حداکثر برسد [۱۵ و ۱۹].

این روش در مقایسه با الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک یا شبکه‌های عصبی مصنوعی، نیاز به تعداد کمتری آزمایش دارد و به راحتی می‌توان نتایج را تحلیل و تفسیر کرد. این روش به ویژه در چرخه‌های ترمودینامیکی که تعداد پارامترهای زیاد و پیچیدگی‌های خاصی دارند، مزیت بیشتری دارد [۲۷ و ۲۸].

هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی یک چرخه تولید توان با استفاده از انرژی زمین گرمایی و خورشیدی، به منظور دستیابی به حداکثر میزان بازده قانون اول و دوم و کاهش تخریب انرژی و نرخ هزینه تخریب انرژی است. در این راستا، دمای تبخیرکن ۱ (T_{evap1} ،

تبخیرکن ۲ (T_{evap2})، چگالنده (T_{cond}) و اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ (T_{pp1}) و ۲ (T_{pp2}) به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شده‌اند. ویژگی‌های کیفی جهت دستیابی به خروجی‌های مورد نظر، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. برای طراحی آزمایش و تحلیل نتایج از نرم افزار Minitab استفاده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های کیفی خروجی‌ها

پارامتر خروجی	ویژگی کیفی
بازده قانون اول	"بزرگتر بهتر است"
بازده قانون دوم	"بزرگتر بهتر است"
تخریب انرژی کل	"کوچکتر بهتر است"
نرخ هزینه تخریب انرژی	"کوچکتر بهتر است"

همانگونه که پیشتر بیان شد، اهمیت دمای تبخیرکن ۱، تبخیرکن ۲، چگالنده و اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ و ۲ در راستای دستیابی به حداکثر میزان بازده قانون اول و دوم و کاهش تخریب انرژی و نرخ هزینه تخریب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. گرچه در طراحی آزمایشی امکان انتخاب هر عددی برای سطوح پارامتر وجود دارد، با این حال در چرخه پیشنهادی اجزای مورد نظر دارای بازه مقادیر مشخص هستند، این محدوده‌های منطقی می‌توانند تا حدودی از طریق مطالعه پژوهش‌های علمی پیشین [۲۴ و ۲۹] حدس زده شوند. بر همین اساس، سطوح انتخاب شده برای این پنج پارامتر در جدول ۲ آورده شده‌اند. در یک طراحی آزمایشی فاکتوریل کامل سنتی، در صورت تعریف ۵ پارامتر در ۳ سطح، نیازمند اجرای ۲۴۳ آزمایش خواهیم بود. با این حال، با بهره‌گیری از روش تاگوچی و استفاده از آرایه‌های متعامد (در این مورد L_{27})، تعداد آزمایش‌ها به ۲۷ کاهش می‌یابد، که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. ساختار آرایه‌های متعامد مانند L_{27} بر اساس اصول ریاضیاتی و نظریه آماری طراحی شده‌اند. این اصول تضمین می‌کنند که هر ترکیب از سطوح مختلف پارامترها به طور مناسب در مجموعه‌ای از آزمایش‌ها پوشش داده شود. برای استفاده از این آرایه‌ها، نیازی به ایجاد رابطه‌ی جدید نیست، بلکه از جداول استاندارد که از قبل در ساختار روش تاگوچی تهیه شده است استفاده می‌شود [۳۰]. پس از انجام ۲۷ دور آزمایش پیشنهادی این روش، از تحلیل واریانس (ANOVA) برای تعیین اهمیت و سهم هر پارامتر ورودی در دستیابی به خروجی‌های ممکن استفاده خواهد شد.

۴- نتایج

۴-۱- صحت‌سنجی

تحلیل انرژی، انرژی و انرژی-اقتصادی چرخه پیشنهادی توسط نرم افزار EES با برنامه نویسی و تعریف پارامترها و معادلات حاکم، انجام می‌شود. در ابتدا، داده‌های عددی به منظور صحت‌سنجی، با یافته‌های منتشر شده توسط وجدی و همکاران [۲۴] مقایسه می‌شوند. جدول ۴ اختلاف بین نتایج عددی حاصل از این مطالعه و داده‌های مرجع را به نمایش می‌گذارد و قابلیت اطمینان روش عددی مورد استفاده را تأیید می‌کند.

پس از تایید صحت روش عددی، سیستم پیشنهادی برای حالت‌های مختلف قید شده در جدول ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، نتایج مربوط به پارامترهای خروجی مختلف، شامل بازده قانون اول (η) و دوم (η_{II}) و تخریب انرژی کل (i_{total}) و نرخ هزینه تخریب انرژی ($Cost$)، در جدول ۵ ثبت شده‌اند. علاوه بر این، این جدول میانگین کلی نتایج مربوطه را نیز دربر می‌گیرد.

جدول ۵- نتایج خروجی بر اساس شماره آزمایشات

شماره آزمایش	η	η_{II}	i_{total} (kW)	Cost (\$/h)
۱	۰/۰۸۵۳۸	۰/۱۲۴۲	۸۷/۸۷	۵/۷۱۹
۲	۰/۰۷۹۱۸	۰/۱۱۷	۱۰۰/۷۹	۶/۸۵۹
۳	۰/۰۷۲۷۸	۰/۱۰۹۶	۱۳۲/۲	۸/۰۸۸
۴	۰/۰۸۸۴۳	۰/۱۲۴۱	۸۸/۸۸	۵/۹۶۲
۵	۰/۰۸۲۶۴	۰/۱۱۷	۱۰۰/۶۶	۷/۰۸۵
۶	۰/۰۷۶۷۶	۰/۱۱	۱۲۷/۵	۸/۲۹۲
۷	۰/۰۹۰۶۸	۰/۱۲	۱۲۸/۳	۶/۳۹۴
۸	۰/۰۸۵۱۴	۰/۱۱۳۷	۱۴۳/۵	۷/۵۰۸
۹	۰/۰۷۹۵۵	۰/۱۰۷۲	۱۶۱	۸/۷۰۱
۱۰	۰/۰۸۸۳	۰/۱۲۹۹	۹۳/۷۲	۵/۵۵۱
۱۱	۰/۰۸۲۱۹	۰/۱۲۳	۱۱۲/۹	۶/۵۲
۱۲	۰/۰۷۵۸۳	۰/۱۱۶	۱۳۶/۲	۷/۵۵۷
۱۳	۰/۰۹۱۵۵	۰/۱۳۰۴	۸۷/۳۸	۵/۷۳۵
۱۴	۰/۰۸۵۹۱	۰/۱۲۳۸	۱۰۳/۶	۶/۶۸۴
۱۵	۰/۰۸۰۱۶	۰/۱۱۷۱	۱۲۲/۷	۷/۶۹۴
۱۶	۰/۰۹۴۹۷	۰/۱۳۱۸	۸۰/۵۴	۵/۲۸۶
۱۷	۰/۰۸۹۵۵	۰/۱۲۵۲	۹۵/۱۹	۶/۱۹۸
۱۸	۰/۰۸۴۰۶	۰/۱۱۸۶	۱۱۲	۷/۱۶۸
۱۹	۰/۰۶۹۷۶	۰/۱۰۰۲	۱۶۸/۹	۱۲/۰۳
۲۰	۰/۰۶۴۹۴	۰/۰۹۵۰۲	۱۹۱/۵	۱۳/۶۸
۲۱	۰/۰۵۹۹۸	۰/۰۸۹۸۷	۲۱۸/۴	۱۵/۴
۲۲	۰/۰۷۲۰۵	۰/۱۰۰۴	۱۶۶	۱۲/۰۱
۲۳	۰/۰۶۷۵۲	۰/۰۹۵۳۹	۱۸۶/۲	۱۳/۶۴
۲۴	۰/۰۶۲۹۴	۰/۰۹۰۴۱	۲۰۹/۴	۱۵/۳۳
۲۵	۰/۰۷۲۷۸	۰/۱۰۰۹	۱۵۸/۹	۱۱/۹۸
۲۶	۰/۰۶۹۴۳	۰/۰۹۵۹۷	۱۷۷/۲	۱۳/۵۹
۲۷	۰/۰۶۵۰۷	۰/۰۹۱۰۸	۱۹۷/۷	۱۵/۲۵
میانگین	۰/۰۷۸۴۶۴۱	۰/۱۱۱۷۷۲	۱۳۷/۱۱۷۸	۹/۱۰۷۸

۴-۲- نتایج بر اساس بازده قانون اول

شکل ۲ نمودارهای مقادیر میانگین برای بازده قانون اول بر اثر تغییر سطوح پارامترهای مدنظر را ارائه می‌دهد. مطابق شکل ۲ با افزایش دمای تبخیرکن ۱ از ۱۱۰ درجه سلسیوس به ۱۲۰ درجه سلسیوس، بازده قانون اول افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود تبدیل گرما به کار است. همچنین افزایش دمای تبخیرکن ۱ از ۱۲۰ درجه سلسیوس به ۱۳۰ درجه سلسیوس، باعث کاهش ۲۱ درصدی بازده

جدول ۲- ویژگی‌های کیفی خروجی‌ها

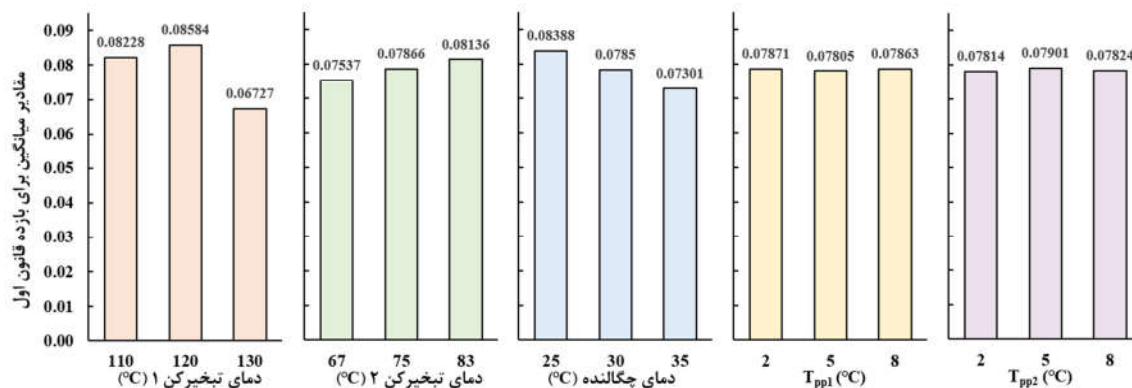
پارامترها	سطوح هر پارامتر		
	۱	۲	۳
T_{evap1} (°C)	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰
T_{evap2} (°C)	۶۷	۷۵	۸۳
T_{pp1} (°C)	۲	۵	۸
T_{pp2} (°C)	۲	۵	۸
T_{cond} (°C)	۲۵	۳۰	۳۵

جدول ۳- آرایه‌های متعامد L27 طراحی آزمایش تاگوچی

شماره آزمایش	T_{evap1} (°C)	T_{evap2} (°C)	T_{pp1} (°C)	T_{pp2} (°C)	T_{cond} (°C)
۱	۱۱۰	۶۷	۲	۲	۲۵
۲	۱۱۰	۶۷	۲	۲	۳۰
۳	۱۱۰	۶۷	۲	۲	۳۵
۴	۱۱۰	۷۵	۵	۵	۲۵
۵	۱۱۰	۷۵	۵	۵	۳۰
۶	۱۱۰	۷۵	۵	۵	۳۵
۷	۱۱۰	۸۳	۸	۸	۲۵
۸	۱۱۰	۸۳	۸	۸	۳۰
۹	۱۱۰	۸۳	۸	۸	۳۵
۱۰	۱۲۰	۶۷	۵	۸	۲۵
۱۱	۱۲۰	۶۷	۵	۸	۳۰
۱۲	۱۲۰	۶۷	۵	۸	۳۵
۱۳	۱۲۰	۷۵	۸	۲	۲۵
۱۴	۱۲۰	۷۵	۸	۲	۳۰
۱۵	۱۲۰	۷۵	۸	۲	۳۵
۱۶	۱۲۰	۸۳	۲	۵	۲۵
۱۷	۱۲۰	۸۳	۲	۵	۳۰
۱۸	۱۲۰	۸۳	۲	۵	۳۵
۱۹	۱۳۰	۶۷	۸	۵	۲۵
۲۰	۱۳۰	۶۷	۸	۵	۳۰
۲۱	۱۳۰	۶۷	۸	۵	۳۵
۲۲	۱۳۰	۷۵	۲	۸	۲۵
۲۳	۱۳۰	۷۵	۲	۸	۳۰
۲۴	۱۳۰	۷۵	۲	۸	۳۵
۲۵	۱۳۰	۸۳	۵	۲	۲۵
۲۶	۱۳۰	۸۳	۵	۲	۳۰
۲۷	۱۳۰	۸۳	۵	۲	۳۵

جدول ۴- نتایج پژوهش حاضر و مرجع [۲۴]

جزء	بازده قانون دوم		تخریب انرژی (kW)	
	کار حاضر	مرجع	کار حاضر	مرجع
تبخیرکن	۰/۸۸۹۶	۰/۸۹۳۲	۱۲/۴۵	۱۲/۲۳
پمپ	۰/۸۷	۰/۸۷۰۳	۰/۲۵	۰/۲۵
توربین	۰/۸۲۹۵	۰/۸۲۹۲	۱۰/۳	۱۰/۳
چگالنده	۰/۵۰۹	۰/۵۰۸۳	۲۶/۲۵	۲۶/۰۹



شکل ۲- مقادیر میانگین برای بازده قانون اول بر اثر تغییر سطوح پارامترهای مختلف

می‌شود، که نشان‌دهنده فراتر رفتن از محدوده دمایی بهینه برای تبخیرکن ۱ است. همچنین با تغییر سطوح دمای تبخیرکن ۲ مشاهده می‌گردد که بازده قانون اول به تدریج افزایش می‌یابد. در نمودار میانی، با افزایش دمای چگالنده، بازده قانون اول به تدریج کاهش پیدا می‌کند، دمای بالای چگالنده می‌تواند نشان دهنده کاهش اختلاف دمایی بین بخار و محیط خنک‌کننده باشد که باعث کاهش انتقال گرما و در نتیجه کاهش بازده می‌شود. و در نهایت با تغییر سطوح اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ و ۲، تغییر چندانی در وضعیت بازده قانون اول رخ نمی‌دهد.

داده‌های تحلیل واریانس (ANOVA) مرتبط با اهمیت پارامترهای مورد مطالعه (دمای تبخیرکن ۱ (T_{evap1})، تبخیرکن ۲ (T_{evap2})، چگالنده (T_{cond}) و اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ (T_{pp1}) و ۲ (T_{pp2})) بر بازده قانون اول در جدول ۶ ثبت شده‌اند. بر پایه این داده‌های آماری، دمای تبخیرکن ۱ به عنوان پارامتر کنترل‌کننده اصلی بازده قانون اول با اهمیت (معنی‌داری) تقریبی ۷۱٪ شناسایی شده است. اهمیت دمای چگالنده حدود ۲۱٪ تخمین زده می‌شود، اما بر اساس ANOVA، اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ و ۲ اهمیت چندانی در تغییر بازده قانون اول ندارند، همچنین دمای تبخیرکن ۲ نیز با اهمیت ۶٪ در رتبه سوم تاثیرگذاری قرار می‌گیرد. اهمیت خطاها و/یا سایر پارامترهای مطالعه نشده حدود ۳٪ تخمین زده می‌شود که می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد.

پارامتر	سطح	مقدار	سهم
T _{evap1}	۲	۱۲۰	۰/۰۰۷۳۷۱
T _{evap2}	۳	۸۳	۰/۰۰۲۸۹۵
T _{pp1}	۱	۲	۰/۰۰۰۲۵۰
T _{pp2}	۲	۵	۰/۰۰۰۵۴۶
T _{cond}	۱	۲۵	۰/۰۰۵۴۱۴
کل سهم‌ها			۰/۰۱۶۴۷۶۰
مقدار متوسط			۰/۰۷۸۴۶۴۱
خروجی مورد انتظار			۰/۰۹۴۹۴۰۱
در حالت بهینه			

با در نظر گرفتن سطوح تعریف شده در جدول ۷، محاسبه مجدد بازده قانون اول بر اساس مقادیر جدید از طریق نرم‌افزار انجام می‌گیرد. در شرایط جدید، بازده قانون اول به میزان ۰/۰۹۴۹۷ به دست آمده است که نشان‌دهنده تفاوتی معادل ۰/۰۳۱۶٪ می‌باشد. این میزان خطا و تفاوت در پیش‌بینی بسیار قابل قبول محسوب می‌شود.

۴-۳- نتایج بر اساس بازده قانون دوم

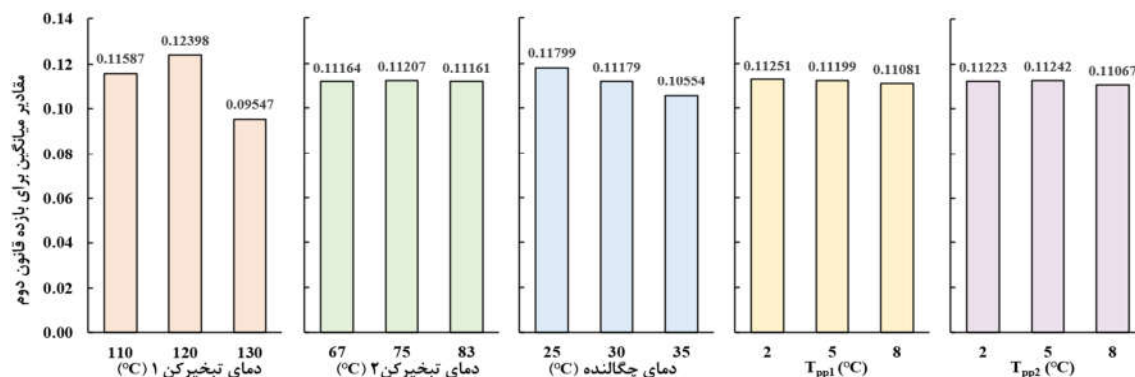
نتایج تحلیلی مربوط به بازده قانون دوم در شکل ۳ به تصویر کشیده شده‌اند، که نشان‌دهنده تأثیر تغییر سطوح پارامترهای مورد بررسی بر مقادیر میانگین بازده قانون دوم می‌باشد. تجزیه و تحلیل این نمودار بیان می‌کند که با افزایش دمای تبخیرکن ۱ از ۱۱۰ به ۱۲۰ درجه سلسیوس، بازده قانون دوم بهبود می‌یابد، اما بالاتر رفتن دما از

داده‌های تحلیل واریانس (ANOVA) مرتبط با اهمیت پارامترهای مورد مطالعه (دمای تبخیرکن ۱ (T_{evap1})، تبخیرکن ۲ (T_{evap2})، چگالنده (T_{cond}) و اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ (T_{pp1}) و ۲ (T_{pp2})) بر بازده قانون اول در جدول ۶ ثبت شده‌اند. بر پایه این داده‌های آماری، دمای تبخیرکن ۱ به عنوان پارامتر کنترل‌کننده اصلی بازده قانون اول با اهمیت (معنی‌داری) تقریبی ۷۱٪ شناسایی شده است. اهمیت دمای چگالنده حدود ۲۱٪ تخمین زده می‌شود، اما بر اساس ANOVA، اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ و ۲ اهمیت چندانی در تغییر بازده قانون اول ندارند، همچنین دمای تبخیرکن ۲ نیز با اهمیت ۶٪ در رتبه سوم تاثیرگذاری قرار می‌گیرد. اهمیت خطاها و/یا سایر پارامترهای مطالعه نشده حدود ۳٪ تخمین زده می‌شود که می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد.

جدول ۶- داده‌های ANOVA برای بازده قانون اول

پارامتر	DF	SS	MS	F-Value	اهمیت %
T _{evap1}	۲	۰/۰۱۷۴۷	۰/۰۰۰۸۷۴	۱۸۰۳/۵۶	۷۱/۲۶
T _{evap2}	۲	۰/۰۰۰۱۶۲	۰/۰۰۰۰۸۱	۱۶۷/۱	۶/۵۷
T _{pp1}	۲	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۱	۲/۴۵	۰/۰۶
T _{pp2}	۲	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰۲	۴/۲۱	۰/۱۳
T _{cond}	۲	۰/۰۰۰۵۳۱	۰/۰۰۰۲۶۶	۵۴۸/۲۳	۲۱/۶۲
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۰۸	۰	-	۰/۳۶
کل	۲۶	۰/۰۰۲۴۵۴	-	-	۱۰۰

جدول ۷ حالت بهینه و تاثیر کلیه پارامترهای مورد مطالعه بر بازده قانون اول را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار مطلوب برای بازده قانون اول در شرایط بهینه شامل دمای تبخیرکن ۱ برابر با ۱۲۰°C (سطح ۲)،



شکل ۳- مقادیر میانگین برای بازده قانون دوم بر اثر تغییر سطوح پارامترهای مختلف

است. این مقدار نسبت به میانگین کلی بازده قانون دوم همانطور که پیش‌تر در جدول ۵ ذکر شده، که برابر ۰/۱۱۱۷۷۲ است، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد.

با استفاده از مقادیر تعیین شده در جدول ۹، بازده قانون دوم با استفاده از نرم‌افزار مجدداً محاسبه شده است. در این حالت جدید، بازده قانون اول به مقدار ۰/۱۳۱۴ رسیده است، که این نتیجه نشان‌دهنده تفاوتی به میزان ۰/۳۶۳۸ درصد است. چنین میزانی از خطا و تفاوت در پیش‌بینی، بسیار معقول و قابل قبول تلقی می‌شود.

جدول ۹- سهم پارامترهای مورد مطالعه در بازده قانون دوم

پارامتر	سطح	مقدار	سهم
T _{evap1}	۲	۱۲۰	۰/۰۱۲۲۰۶
T _{evap2}	۲	۷۵	۰/۰۰۰۲۹۵
T _{pp1}	۱	۲	۰/۰۰۰۷۳۹
T _{pp2}	۲	۵	۰/۰۰۰۶۴۹
T _{cond}	۱	۲۵	۰/۰۰۶۲۱۷
کل سهم‌ها			۰/۰۲۰۱۰۶
مقدار متوسط			۰/۱۱۱۷۷۲
خروجی مورد انتظار در حالت بهینه			۰/۱۳۱۸۷۸

۴-۴- نتایج بر اساس تخریب اگزرژی کل

هدف از تحلیل نتایج مربوط به تخریب اگزرژی کل که مقادیر میانگین آن بر اثر تغییر پارامترهای مختلف در شکل ۴ به تصویر کشیده شده‌اند، کاهش میزان این تخریب است. بررسی دقیق این نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش دمای تبخیرکن ۱ از ۱۱۰ به ۱۲۰ درجه سلسیوس، شاهد کاهش تخریب اگزرژی کل هستیم. با این حال، افزایش دما بیش از ۱۲۰ درجه سلسیوس، به ویژه رسیدن به ۱۳۰ درجه، به طور قابل توجهی به افزایش تخریب اگزرژی منجر می‌شود، که نشان‌دهنده ضرورت مدیریت دقیق دمای تبخیرکن ۱ در این محدوده است.

همچنین، مشاهده می‌شود که دمای تبخیرکن ۲ در دمای ۷۵ درجه سلسیوس (سطح دوم) نتایج نسبتاً بهتری نسبت به سایر سطوح دارد. از سوی دیگر، افزایش دمای چگالنده، که به تدریج منجر به افزایش تخریب اگزرژی می‌شود، به عنوان یک عامل نامطلوب در نظر گرفته

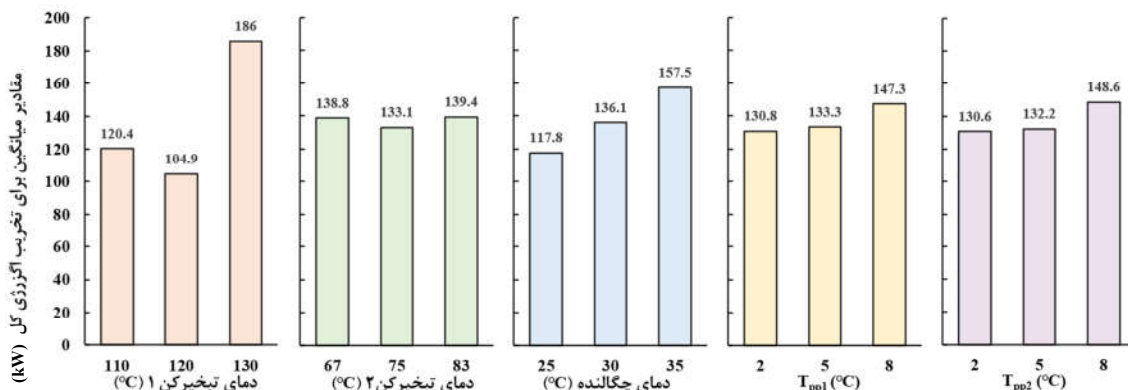
۱۲۰ به ۱۳۰ درجه سلسیوس باعث کاهش ۳۰ درصدی بازده می‌شود، که نشان‌دهنده عدم بهره‌وری بیش از حد سیستم است. تحلیل نشان می‌دهد که تغییرات دمای تبخیرکن ۲ تأثیر کمی بر بازده دارد، در حالی که افزایش دمای چگالنده موجب کاهش تدریجی بازده می‌شود. این کاهش می‌تواند به دلیل پایین آمدن اختلاف دمایی بین بخار و محیط خنک‌کننده باشد. همچنین تغییر در سطوح اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌های ۱ و ۲ تأثیر چشمگیری بر بازده ندارد.

اطلاعات مربوط به تحلیل واریانس (ANOVA) پارامترهای مورد بررسی، از جمله دمای تبخیرکن‌های ۱ و ۲، چگالنده و اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌های ۱ و ۲، در جدول ۸ ثبت شده است. از نظر آماری، دمای تبخیرکن ۱ با ۸۴٪ اهمیت، عامل اصلی تأثیرگذار بر بازده قانون دوم شناخته شده است. دمای چگالنده با تقریباً ۱۵٪ اهمیت تأثیرگذار محسوب می‌شود، در حالی که اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌ها و دمای تبخیرکن ۲ تأثیر چندانی ندارند. اهمیت خطاها و پارامترهای دیگر نیز حدود ۰/۳۳٪ برآورد شده است که می‌توان نادیده گرفت.

جدول ۸- داده‌های ANOVA برای بازده قانون دوم

پارامتر	DF	SS	MS	F-Value	اهمیت %
T _{evap1}	۲	۰/۰۰۳۸۸۳	۰/۰۰۱۹۴۲	۲۱۹۱/۵۹	۸۴/۰۲
T _{evap2}	۲	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۶۷	۰/۰۰
T _{pp1}	۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۰۷	۷/۷۳	۰/۲۶
T _{pp2}	۲	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۰۸	۹/۴	۰/۳۲
T _{cond}	۲	۰/۰۰۰۶۹۷	۰/۰۰۰۳۴۹	۳۹۳/۵۹	۱۵/۰۶
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۰۱	-	۰/۳۳
کل	۲۶	۰/۰۰۴۶۲۶	-	-	۱۰۰

در جدول ۹، حالت بهینه و تأثیر کلیه عوامل بر روی بازده قانون دوم ارائه شده است. در این حالت بهینه، بیشترین بازده قانون دوم با دمای تبخیرکن ۱ در ۱۲۰°C (سطح ۲)، دمای تبخیرکن ۲ در ۷۵°C (سطح ۲)، اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۱ در ۲°C (سطح ۱)، اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۲ در ۵°C (سطح ۲) و دمای چگالنده در ۲۵°C (سطح ۱) به دست می‌آید. تأثیرات مجموعه‌ای این پارامترها در جدول ۹ محاسبه شده‌اند و مجموع تأثیرات آنها ۰/۰۲۰۱۰۶ می‌باشد. با اعمال این سطوح بهینه، بازده قانون دوم به ۰/۱۳۱۸۷۸ افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در عملکرد سیستم



شکل ۴- مقادیر میانگین برای تخریب انرژی کل بر اثر تغییر سطوح پارامترهای مختلف

این کاهش نسبت به میانگین کلی تخریب انرژی کل که قبلاً در جدول ۵ به عنوان ۱۳۷/۱۱۸ ثبت شده، یک پیشرفت قابل ملاحظه است. این یافته‌ها نشان‌دهنده اثربخشی انتخاب سطوح بهینه در کاهش تخریب انرژی کل و بهبود عملکرد کلی سیستم می‌باشد.

جدول ۱۱- سهم پارامترهای مورد مطالعه در تخریب انرژی کل

پارامتر	سطح	مقدار	سهم (kW)
T_{evap1}	۲	۱۲۰	-۲۲/۲۰۳
T_{evap2}	۲	۷۵	-۳/۹۷۸
T_{pp1}	۱	۲	-۶/۳۰۷
T_{pp2}	۱	۲	-۶/۵۱۲
T_{cond}	۱	۲۵	-۱۹/۲۸۶
کل سهم‌ها			-۶۸/۲۸۶
مقدار متوسط			۱۳۷/۱۱۸
خروجی مورد انتظار در حالت بهینه			۶۸/۸۳۲

۴-۵- نتایج بر اساس نرخ هزینه تخریب انرژی

کنترل و کاهش هزینه‌های تخریب انرژی از جمله موارد حیاتی در بهبود کارایی سیستم‌های گرمایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌باشد. در این راستا، تحلیل نتایج مربوط به نرخ هزینه تخریب انرژی، که در شکل ۵ به توجه به تغییر پارامترهای مختلف نمایش داده شده است، از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این تحلیل کاهش میزان هزینه‌های ناشی از تخریب انرژی در سیستم است. از آنجایی که نرخ هزینه گردآور خورشیدی به دلیل مقادیر بسیار بزرگ خود نسبت به سایر اجزا و کاهش حساسیت از این تحلیل حذف شده است، نتایج به دست آمده فقط نرخ کل هزینه تخریب انرژی برای سایر اجزا را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل دقیق این نمودارها بیان می‌کند که با افزایش دمای تبخیرکن ۱ از ۱۱۰ به ۱۲۰ درجه سلسیوس، کاهش نرخ تخریب انرژی مشاهده می‌شود. با این حال، افزایش دما بیش از ۱۲۰ درجه سلسیوس، به ویژه رسیدن به ۱۳۰ درجه سلسیوس، منجر به افزایش قابل توجه نرخ هزینه تخریب انرژی می‌شود، که نشان‌دهنده حالت بهینه بین ۱۱۰ و ۱۳۰ درجه سلسیوس می‌باشد. افزایش دمای

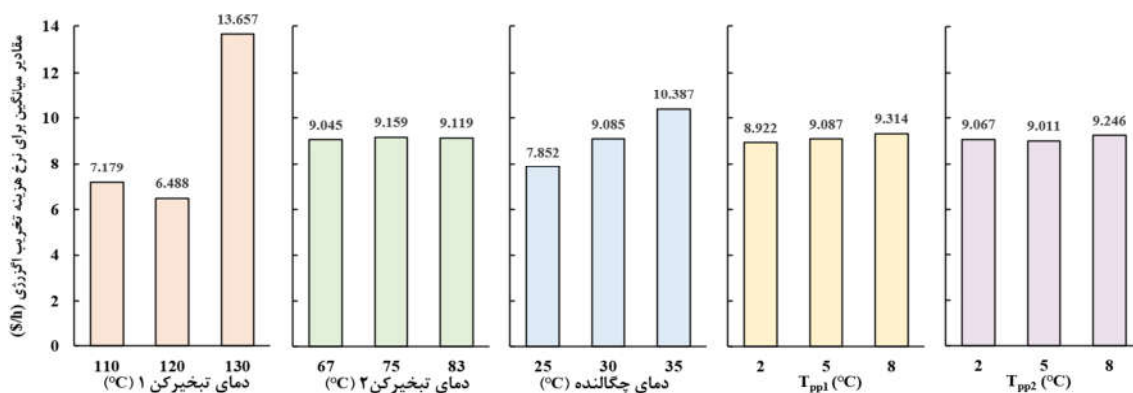
می‌شود. این نتیجه بر اهمیت مدیریت و تنظیم دمای چگالنده تأکید می‌کند. علاوه بر این، افزایش اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌های ۱ و ۲، به ویژه از ۵ درجه به ۸ درجه سلسیوس، به افزایش قابل توجه تخریب انرژی کل منجر می‌شود.

در جدول ۱۰، اطلاعات مربوط به تحلیل واریانس (ANOVA) پارامترهای مورد بررسی ثبت شده است. از دیدگاه آماری، دمای تبخیرکن ۱ با ۷۶٪ اهمیت، به عنوان عامل اصلی تأثیرگذار بر تخریب انرژی کل شناسایی شده است. این نشان می‌دهد که کنترل دقیق دمای تبخیرکن ۱ می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود کارایی داشته باشد. دمای چگالنده با حدود ۱۶٪ اهمیت، دومین عامل تأثیرگذار است. در مقابل، دمای تبخیرکن ۲ تأثیر کمتری دارد. همچنین، تغییرات در اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌های ۱ و ۲ به ترتیب تقریباً ۳ و ۴ درصد تأثیرگذاری دارند. در نهایت، اهمیت خطاها و سایر پارامترهای مورد مطالعه حدود ۰/۳۶ برآورد شده است، که نشان‌دهنده این است که عوامل دیگر تأثیر چندانی بر نتایج ندارند و می‌توان آنها را در تحلیل‌های بیشتر نادیده گرفت.

جدول ۱۰- داده‌های ANOVA برای تخریب انرژی کل

پارامتر	DF	SS	MS	F-Value	اهمیت %
T_{evap1}	۲	۳۳۳۶۸/۶	۱۶۶۸۴/۳	۱۹۱۳/۷۹	۷۵/۹۱
T_{evap2}	۲	۲۱۴/۹	۱۰۷/۴	۱۲/۳۲	۰/۴۵
T_{pp1}	۲	۱۴۱۴/۵	۷۰۷/۲	۸۱/۱۲	۳/۱۸
T_{pp2}	۲	۱۷۸۴/۶	۸۹۲/۳	۱۰۲/۳۵	۴/۰۲
T_{cond}	۲	۷۰۸۰	۳۵۴۰	۴۰۶/۰۶	۱۶/۰۸
خطا	۱۶	۱۳۹/۵	۸/۷	-	۰/۳۶
کل	۲۶	۴۴۰۰۲/۱	-	-	۱۰۰

جدول ۱۱ حالت بهینه و تأثیر عوامل متعدد بر تخریب انرژی کل را نمایش می‌دهد. در این حالت بهینه، کمترین میزان تخریب انرژی کل با تنظیم دمای تبخیرکن ۱ روی ۱۲۰°C (سطح ۲)، دمای تبخیرکن ۲ روی ۷۵°C (سطح ۲)، اختلاف دمای تنگش بین تبخیرکن ۱ و ۲ روی ۲°C (سطح ۱) و دمای چگالنده روی ۲۵°C (سطح ۱) محقق می‌شود. در جدول ۱۱، سهم هر یک از این پارامترها محاسبه شده است که مجموع سهم آن‌ها به ۶۸/۲۸۶ می‌رسد. با استفاده از این سطوح بهینه، تخریب انرژی کل به ۶۸/۸۳۲ کاهش می‌یابد، که



شکل ۵- مقادیر میانگین برای نرخ هزینه تخریب آگرزوی بر اثر تغییر سطوح پارامترهای مختلف

جدول ۵ که برابر با ۹/۱۰۷۸ است، پیشرفت قابل توجهی محسوب می‌شود. این نتایج بیانگر تأثیر مثبت و موثر انتخاب سطوح بهینه بر کاهش نرخ هزینه تخریب آگرزوی است و اهمیت انتخاب دقیق پارامترها در بهبود کارایی سیستم را نشان می‌دهد.

جدول ۱۳- سهم پارامترهای مورد مطالعه در نرخ هزینه تخریب آگرزوی

پارامتر	سطح	مقدار	سهم (S/h)
T _{evap1}	۲	۱۲۰	-۲/۶۱۹۷
T _{evap2}	۱	۶۷	-۰/۰۶۲۹
T _{pp1}	۱	۲	-۰/۱۸۵۸
T _{pp2}	۲	۵	-۰/۰۹۶۶
T _{cond}	۱	۲۵	-۱/۲۵۵۹
کل سهم‌ها			-۴/۲۲۰۹
مقدار متوسط			۹/۱۰۷۸
خروجی مورد انتظار در حالت بهینه			۴/۸۸۶۹

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ارزیابی دقیقی از سیستم تولید توان بر پایه انرژی زمین گرمایی و خورشیدی صورت گرفته است. این مطالعه با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی، برهمکنش تغییر دمای اجزای مهم سیستم، از جمله دمای تبخیرکن‌ها و چگالنده را بررسی کرده است. یافته‌های برجسته از این تحقیق به شرح زیر هستند:

- دمای تبخیرکن: دمای تبخیرکن متصل به گردآور خورشیدی مهم‌ترین عامل بر تمامی خروجی‌های مطلوب بوده است، این پارامتر با تأثیر ۹۰ درصدی بر نرخ هزینه آگرزوی، کاهش نرخ هزینه آگرزوی به ۶/۴۸ S/h و در حالت بهینه به ۴/۸۸ S/h را ثبت کرده است.
- کارایی سیستم: تحت شرایط بهینه، سیستم می‌تواند بازده قانون اول را تا ۱۷٪ و بازده قانون دوم را تا ۱۲٪ نسبت به میانگین افزایش دهد. همچنین کاهش ۴۸ درصدی را نسبت به مقدار میانگین، در نرخ هزینه تخریب آگرزوی تجربه می‌کند.

۶- نمادها

DF درجه آزادی

چگالنده نیز به تدریج باعث افزایش نرخ هزینه تخریب آگرزوی می‌شود، از سوی دیگر، افزایش اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌های ۱ و ۲ و تغییر سطوح دمای تبخیرکن ۲ تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه‌ها ندارند.

بر اساس جدول ۱۲ و تحلیل واریانس (ANOVA)، دمای تبخیرکن ۱ با ۹۰٪ اهمیت، به عنوان عامل اصلی تأثیرگذار بر نرخ هزینه تخریب آگرزوی شناسایی شده است. این امر نشان می‌دهد که کنترل دقیق دمای تبخیرکن ۱ می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های تخریب آگرزوی داشته باشد. دمای چگالنده نیز با تقریباً ۹٪ اهمیت، دومین عامل تأثیرگذار شناخته شده است. در مقابل، دمای تبخیرکن ۲ و تغییرات در اختلاف دمای تنگش تبخیرکن‌های ۱ و ۲ تأثیر ناچیزی در کاهش نرخ هزینه تخریب آگرزوی دارند و می‌توان از تغییر مقادیر آن‌ها در راستای بهینه‌سازی هزینه تخریب آگرزوی صرف نظر کرد.

جدول ۱۲- داده‌های ANOVA برای تخریب آگرزوی کل

پارامتر	DF	SS	MS	F-Value	اهمیت %
T _{evap1}	۲	۲۸۱/۴۸۹	۱۴۰/۷۴۴	۱۴۹۴/۴۴	۹۰/۰۹
T _{evap2}	۲	۰/۰۶۱	۰/۰۳	۰/۳۲	۰
T _{pp1}	۲	۰/۶۹۷	۰/۳۴۹	۳/۷۰	۰/۱۷
T _{pp2}	۲	۰/۲۷	۰/۱۳۵	۱/۴۴	۰/۰۳
T _{cond}	۲	۲۸/۹۲	۱۴/۴۶	۱۵۳/۵۴	۹/۲۱
خطا	۱۶	۱/۵۰۷	۰/۰۹۴	-	۰/۵
کل	۲۶	۳۱۲/۹۴۳	-	-	۱۰۰

جدول ۱۳ نشان دهنده حالت بهینه و تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ هزینه تخریب آگرزوی است. در این شرایط بهینه، حداقل نرخ هزینه تخریب آگرزوی با تنظیم دمای تبخیرکن ۱ بر روی ۱۲۰°C (سطح ۲)، دمای تبخیرکن ۲ بر روی ۶۷°C (سطح ۱)، و تنظیم اختلاف دمای تنگش بین تبخیرکن‌های ۱ و ۲ به ترتیب در ۲°C (سطح ۱) و ۵°C (سطح ۲)، همراه با دمای چگالنده در ۲۵°C (سطح ۱) به دست آمده است.

بر اساس محاسبات ارائه شده در جدول ۱۳، مجموع تأثیر این پارامترها منجر به کاهش کلی به میزان ۴/۲۲۰۹ می‌گردد. با اجرای این تنظیمات بهینه، نرخ هزینه تخریب آگرزوی به ۴/۸۸۶۹ S/h کاهش می‌یابد، که این میزان کاهش در مقایسه با میانگین کلی ثبت شده در

[16] Tsui K-L. An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design. *Iie Transactions*. 1992;24(5):44-57.

[17] Asl MS, Kakroudi MG, Golestani-Fard F, Nasiri H. A Taguchi approach to the influence of hot pressing parameters and SiC content on the sinterability of ZrB₂-based composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015;51:81-90.

[18] Megdouli K, Gholizadeh T, Tashtoush B, Cinnella P, Skorek-Osikowska A. Optimization of carbon dioxide ejector expansion transcritical refrigeration system with ANOVA and NSGA-II. *International Journal of Refrigeration*. 2024;158:173-89.

[19] Naderi M, Vajdi M, Sadegh Moghanlou F, Nami H. Sensitivity analysis of fluid flow parameters on the performance of fully dense ZrB₂-made micro heat exchangers. *Synthesis and Sintering*. 2023;3(2):88-106.

[20] Oza VH, Bhatt NM. Optimization of ammonia-water absorption refrigeration system using Taguchi method of design of experiment. *International Journal of Mechanics and Solids*. 2018;13(2):111-26.

[21] 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.

[22] Bademlioglu AH, Canbolat AS, Kaynakli O. Multi-objective optimization of parameters affecting Organic Rankine Cycle performance characteristics with Taguchi-Grey Relational Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;117:109483.

[23] Shu G, Zhao M, Tian H, Huo Y, Zhu W. Experimental comparison of R123 and R245fa as working fluids for waste heat recovery from heavy-duty diesel engine. *Energy*. 2016;115:756-69.

[24] Vajdi M, Ghasemzadeh N, Behnoud V, Sadegh Moghanlou F. Energy, exergy, and exergoeconomic analysis of power generation cycle based on independent geothermal and solar energy. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*. 2022;38(2):87-96.

[25] Sadeghi M, Chitsaz A, Mahmoudi SMS, Rosen MA. Thermo-economic optimization using an evolutionary algorithm of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell. *Energy*. 2015;89:191-204.

[26] Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants. *Energy*. 2011;36(10):5886-98.

[27] Huang M-L, Hung Y-H, Yang Z-S. Validation of a method using Taguchi, response surface, neural network, and genetic algorithm. *Measurement*. 2016;94:284-94.

[28] Gul M, Shah AN, Aziz U, Husnain N, Mujtaba MA, Kousar T, et al. Grey-Taguchi and ANN based optimization of a better performing low-emission diesel engine fueled with biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022;44(1):1019-32.

[29] Javaherdeh K, Amin Fard M, Zoghi M. Thermo-economic analysis of organic Rankine cycle with cogeneration of heat and power operating with solar and geothermal energy in Ramsar. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(13):56-63.

[30] Cimbala JM. Taguchi orthogonal arrays. *Pennsylvania State University*. 2014:1-3.

مجموع مربعات	SS
میانگین مربعات	MS
دما (°C)	T
دبی جرمی	m
نرخ انتقال گرما (kW)	Q̇
نرخ کار (kW)	Ẇ
آنتالپی ویژه (kJ/kg)	h
بازده قانون دوم	η _{II,cycle}
بازده قانون اول	η _{I,cycle}

۷- مراجع

[1] Li K, Bian H, Liu C, Zhang D, Yang Y. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;42:1464-74.

[۲] خداپرست ش، زارع و، محمدخانی ف. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک پیکربندی نوین مایع‌سازی هیدروژن بر مبنای انرژی زمین گرمایی دما پایین. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۲؛ ۵۳(۱):۱۱۱-۲۰.

[3] Rahbar K, Mahmood S, Al-Dadah RK, Moazami N, Mirhadizadeh SA. Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. *Energy conversion and management*. 2017;134:135-55.

[4] Stram BN. Key challenges to expanding renewable energy. *Energy Policy*. 2016;96:728-34.

[5] Li K, Liu C, Jiang S, Chen Y. Review on hybrid geothermal and solar power systems. *Journal of cleaner production*. 2020;250:119481.

[6] Cakici DM, Erdogan A, Colpan CO. Thermodynamic performance assessment of an integrated geothermal powered supercritical regenerative organic Rankine cycle and parabolic trough solar collectors. *Energy*. 2017;120:306-19.

[7] Zhou C, Doroodchi E, Moghtaderi B. An in-depth assessment of hybrid solar-geothermal power generation. *Energy conversion and management*. 2013;74:88-101.

[8] Astolfi M, Xodo L, Romano MC, Macchi E. Technical and economical analysis of a solar-geothermal hybrid plant based on an Organic Rankine Cycle. *Geothermics*. 2011;40(1):58-68.

[9] Ghasemi H, Sheu E, Tizzanini A, Paci M, Mitsos A. Hybrid solar-geothermal power generation: Optimal retrofitting. *Applied energy*. 2014;131:158-70.

[۱۰] عبدالعلی پور م. تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید همزمان بر اساس یک چرخه برایتون فوق‌بحرانی دی-اکسیدکربن. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۲؛ ۵۳(۳):۲۵-۳۴.

[11] Mohammadkhani F, Shokati N, Mahmoudi S, Yari M, Rosen M. Exergoeconomic assessment and parametric study of a Gas Turbine-Modular Helium Reactor combined with two Organic Rankine Cycles. *Energy*. 2014;65:533-43.

[12] El-Emam RS, Dincer I. Exergy and exergoeconomic analyses and optimization of geothermal organic Rankine cycle. *Applied thermal engineering*. 2013;59(1-2):435-44.

[13] Calise F, d'Accadia MD, Macaluso A, Piacentino A, Vanoli L. Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water. *Energy Conversion and Management*. 2016;115:200-20.

[14] Ustaoglu A, Kursuncu B, Metin Kaya A, Caliskan H. Analysis of vapor compression refrigeration cycle 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.

[15] Karna SK, Sahai R. An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*. 2012;1(1):1-7.