



بهینه سازی عملکرد سیکل رانکین آلی مبتنی بر مطالعه مقایسه ای روش‌های باکس-بهنکن و مرکب مرکزی

محمد احسان کاظمیان^{۱،*}، سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب^{۱*} و ابراهیم جهانشاهی جواران^۱

^۱ بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲ بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴

چکیده

در این مقاله با کمک مدلسازی ترمودینامیکی سیکل رانکین آلی، تاثیر برخی پارامترها بر راندمان حرارتی و حرارت ورودی سیکل با استفاده از روش طرح ریزی آزمایش‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با بهره گیری از این تکنیک و ترکیب آن با مدل حذف رگرسیون پس گرد مقدار راندمان حرارتی و حرارت ورودی سیکل به صورت توابعی از پارامترهای موثر معرفی می‌شوند. در این راستا ابتدا با مقایسه دو روش پاسخ سطح و انتخاب رویه طراحی مرکب مرکزی، مقادیر توابع پاسخ بر اساس متغیرهای ورودی مشخص شده‌اند. مقادیر عددی حاصل از توابع منتج از روش پاسخ سطح مرکب مرکزی، همخوانی خوبی با سایر مقالات معتبر دارد. نتایج نشان می‌دهند که از میان پارامترهای موثر، مقادیر دمای ورودی توربین، راندمان آیزنتروپیک توربین و نسبت دبی‌های جرمی سیال عامل به آب خنک کننده کندانسور، بیشترین تاثیر را بر راندمان حرارتی دارند و برای حرارت ورودی به سیکل نیز بیشترین تاثیر پذیری در تغییر دبی سیال عامل، اختلاف دمای کندانسور و دمای ورودی به توربین سیکل رانکین آلی مشاهده می‌شود. نتایج بهینه سازی عددی بر مبنای تابع مطلوبیت و رویه پاسخ مرکب مرکزی نیز نشان دهنده حصول راندمانی معادل با ۳۶٪ به ازای حرارت ورودی ۱۳۰ kW است.

کلمات کلیدی: سیکل رانکین آلی؛ بهینه سازی؛ پارامترهای طراحی؛ راندمان حرارتی؛ روش پاسخ سطح.

Performance Optimization of Organic Rankin Cycle (ORC) Based on Comparative Study of Box –Behnken and Central Composite Design Methods

M.E. Kazemian^{1,2}, S.A. Gandjalikhan Nassab^{1,*}, E. Jahanshahi Javaran¹

¹ Mechanical Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Bam Higher Education Complex, Bam, Iran.

Abstract

In this paper, with the aid of thermodynamic modeling of Organic Rankin Cycle (ORC), the effect of some parameters on the thermal efficiency and input heat of ORC is examined using design of experiment method. By this technique, along with the Backward Elimination Regression model, the values of thermal efficiency and input heat of ORC are introduced as a function of effective parameters. For this purpose, first, by comparing the two methods of surface response and selecting the central composite design procedure, the values of response functions were computed based on the input variables. The numerical values derived from these functions resulting from RSM central composite design are in good agreement with published theoretical results in literatures. The results show that among the effective parameters, turbine inlet temperature values, turbine isentropic efficiency, and mass flow ratio have most significant effect on thermal efficiency and also for input heat to ORC the most effective parameters are flow rate of working fluid, condenser temperature and input temperature of ORC's turbine. In order to numerical optimization according to the operating conditions of real cycles based on the desirability function and the central composite design procedure, it was revealed that the thermal efficiency is close to 36% for the heat input of 130 kW.

Keywords: Organic Rankin Cycle; Optimization; Design Parameters; Thermal Efficiency; Response Surface Methodology (RSM).

۱- مقدمه

با توجه به بهره برداری فزاینده از ذخایر انرژی فسیلی جهان و آلاینده‌گی بالای محصولات احتراق، استفاده از فرآیندهای تولید توان با حداقل گرمای مورد نیاز، یکی از ایده‌های کاربردی محققان بوده است که در اکثر کشورهای توسعه یافته در حال اجرا است. استفاده از سیکل رانکین آلی با استفاده از گرمای هدر رفت در منبع دما بالای سیکل، گامی موثر در تولید توان با کمینه حرارت دریافتی است و پژوهش‌های فراوانی در زمینه ارتقا عملکرد سیکل رانکین آلی صورت پذیرفته است.

ابرنبرگر و همکاران [۱]، به بررسی میزان بازده و کارکرد مفید سیستم رانکین آلی متصل به سیستم تولید همزمان زیست توده به صورت عملی پرداختند. به گفته آنها مزایای ویژه‌ی تکنولوژی سیکل رانکین آلی، این است که هزینه پایین برای نگهداری و طول عمر بالا، انجام تمام فعالیت‌ها به صورت اتوماتیک و حداکثر پنج ساعت در هفته نیازمند واحد پرسنلی است.

فیرا و کاتارینو [۲]، به مقایسه ترمودینامیکی سیالات عامل سیکل رانکین با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور طراحی بهینه بین توان و هزینه تولیدی پرداختند. بها الدین صالح و همکاران [۳]، به بررسی طیف وسیعی از سیال کاری در سیکل رانکین آلی پرداختند که تمامی این بررسی‌ها به صورت ترمودینامیکی بوده است. برای هر بار تحلیل سیال یک راندمان حرارتی ارائه و بررسی شده است و اگر بخار خروجی از توربین بیش از حد گرم شود، بعد از توربین یک مبدل حرارتی داخلی قرار داده می‌شود که این مورد نیز مورد بررسی قرار داده شد. نتایج بدست آمده حاکی از وقوع بیشترین مقدار راندمان حرارتی برای سیالاتی با دمای جوش بالا است؛ همچنین حبیب زاده و رشیدی [۴] نیز، آنالیز ترمودینامیکی سیکل رانکین آلی بر مبنای تغییر سیال عامل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بر مبنای محاسبه بهینه سازی حداقل نسبت فشار و حداکثر راندمان حرارتی سیکل گزارش شده است.

چاکارتیگویی و همکاران [۵]، به امکان سنجی استفاده از سیکل رانکین آلی در سیستم های تولید همزمان بر پایه آنالیز ترمودینامیکی پرداختند. آنها سیکل رانکین آلی دما پایین به عنوان یک سیکل مجزا برای ترکیب با نیروگاه‌های

تولید همزمان تقریباً بزرگ را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. هدف اصلی پژوهش، تحلیل و بررسی استفاده از چرخه رانکین آلی با توربین‌هایی با کارایی بالا به عنوان مثال توربین های بخار احیا کننده (بازیاب حرارت) بوده است و نتایج هم نشان دهنده کارایی بالای این سیستم بود. شوکتی و رنجبر [۶]، تحلیل و مقایسه انرژی، انرژی و ترمواقصدی سیکل تولید توان تک تبخیره زمین گرمایی با سیکل‌های تولید توان کالینا و سیکل رانکین با سیال‌های عامل مختلف پرداختند و نتایج را بر اساس نحوه ترکیب سیکل و استفاده از نوع سیال عامل ارائه کردند.

ابوالوفا و همکاران [۷]، سیستم‌های چرخه رانکین خورشیدی برای تولید برق را مورد بررسی قرار دادند. آنها بر عواملی همچون نوع سیال عامل، نحوه عملکرد و چیدمان سیستم و استفاده از این سیستم‌ها در پمپاژ آب و شیرین سازی آب تمرکز کردند. چهارطاقی و بابایی [۸]، به بررسی عملکرد سیکل رانکین آلی با توجه به دمای ورودی و خروجی و دبی جریان منبع حرارتی پرداختند؛ همچنین با ثابت نگه داشتن دمای ورودی و خروجی جریان منبع حرارتی و دبی جرمی آن با انتخاب سیالات آلی دوجزبی عملکرد سیکل از لحاظ انرژی و و انرژی و و انرژی برای دو نوع پیکربندی ساده و همراه با مبدل حرارتی داخلی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان دهنده افزایش بازده در استفاده از سیالات دوجزبی بوده است. بعلاوه دما و فشار در چگالنده و تبخیرکننده بر اساس شیب دمایی جریان گرم و سرد و اختلاف دمای پینچ بدست آمد.

بدر و همکاران [۹]، به مطالعه ویژگی‌های مورد نیاز سیال کاری ایده آل سیکل رانکین پرداختند که بین حد مجاز حداکثر و حداقل دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد و ۴۰ درجه سانتیگراد عمل می‌کنند. نتایج حاصل از بررسی قابلیت سازگاری شصت و هشت سیال عامل بالقوه ارائه شده است. مناسب بودن سیال از لحاظ شرایط ترمودینامیکی، پایداری حرارتی، در دسترس بودن، هزینه‌ها و الزامات ایمنی، عوامل اصلی برای پذیرش در فرایند غربالگری بود.

محمودی و همکاران [۱۰]، به بررسی تجربیات تحقیقاتی در رابطه با استفاده از سیکل رانکین آلی برای بازیابی حرارت و بررسی تاثیر پیکربندی سیکل، انتخاب سیال عامل و شرایط عملیاتی بر عملکرد سیستم در طول دوره چهار ساله

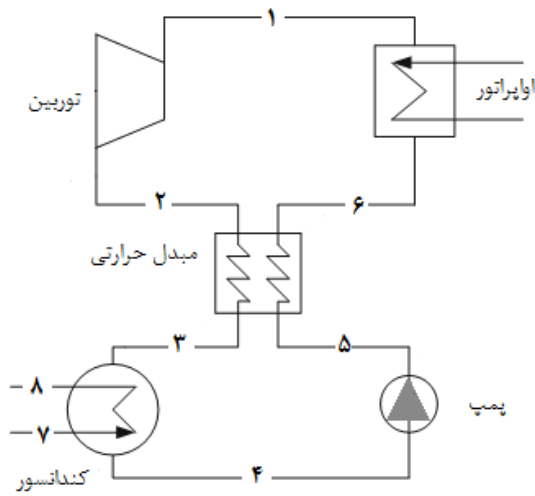
عملکرد سیکل ترکیبی توربین گاز استفاده کردند. بادملیگلو و همکاران [۱۹]، پارامترهای موثر بر بازدهی چرخه رانکین ارگانیک با استفاده از روش‌های آنالیز واریانس و تاگوچی مورد بررسی قرار دادند. گویال و همکاران [۲۰]، به بررسی ترمودینامیکی سیکل رانکین آلی منبع دما پایین با استفاده از روش پاسخ سطح پرداختند و با استفاده از روش پاسخ سطح، مدل ریاضی چند جمله‌ای غیرخطی مرتبه دوم را جهت ارتباط بین بازده حرارتی سیکل و متغیرهای تصمیم‌گیری ارائه کردند.

نگارندگان پژوهش حاضر تاکنون تحقیقی کامل در خصوص آنالیز حساسیت سیکل رانکین آلی با استفاده از روش طرح ریزی آزمایش‌ها و آنالیز واریانس نیافته‌اند. هرچند روش‌های آماری مختلفی مانند، روش طرح ریزی آزمایش و روش پاسخ سطح برای تعیین پارامترهای موثر در کاربردهای مهندسی توسط برخی محققان مورد توجه قرار گرفته است. محمدی و ارغوانی [۲۱]، از روش پاسخ سطح برای بررسی مدل سازی یک بعدی و بهینه‌سازی پرتابه گاز سبک دو مرحله‌ای استفاده کردند. نتایج آنها اثربخشی روش برای تأیید روند را نشان می‌دهد. اوکاتی و همکاران [۲۲]، حساسیت پارامترهای اولیه آب شیرین کن خورشیدی را با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش پاسخ سطح به منظور دستیابی به شرایط مطلوب، تجزیه و تحلیل کردند. آنها نمودار متفاوتی را برای کمک به طراح در انتخاب پارامترهای مناسب طراحی بر اساس شرایط عملیاتی ارائه دادند. مهرور و همکاران [۲۳]، در فرآیند الکتروشمیایی با استفاده از روش پاسخ سطح به عنوان روش طراحی آزمایش‌ها و تابع مطلوبیت به ارائه راهکار جهت بهینه‌سازی همزمان متغیرهای پاسخ پرداختند. پیرمحمد و اسماعیلی [۲۴]، در مقایسه عملکردی جذب انرژی سازه‌های دو جداره با استفاده از روش‌های پاسخ سطح و طراحی مرکب مرکزی، به شناسایی نقاط مهم و بهینه‌سازی متغیرهای طراحی پرداختند. از مزایای استفاده از روش طرح ریزی آزمایش‌ها می‌توان به سرعت بالای عملیاتی تابع پاسخ در سیستم‌های کنترل اتوماتیک اشاره نمود که یک تابع پاسخ بر اساس پارامترهای تأثیرگذار و قابل تغییر جایگزین کد محاسباتی می‌شود؛ لذا در پژوهش حاضر با توجه به متغیرهای ورودی مختلف سیکل رانکین آلی، آنالیز حساسیت برخی از پارامترهای قابل تغییر از قبیل دما و فشار

پرداختند و در نهایت، آمار مربوطه در رابطه با چیدمان و سیال کار با انواع منبع حرارت گزارش شد. باروتکوب و همکاران [۱۱]، طراحی و تحلیل ترمودینامیکی اقتصادی سیکل رانکین آلی گذر بحرانی با محرک توربین گاز جهت تولید توان الکتریکی، گرمایش سوخت و سرمایش گاز متان به عنوان اهداف اصلی متناسب با نیاز ایستگاه تقویت فشار را انجام دادند؛ همچنین با استفاده از آنالیز حساسیت اثر متغیرهای طراحی از قبیل، فشار و دمای ورودی به توربین، دمای چگالش و دمای ورودی به دیگ بخار روی پارامترهای عملکردی سیکل مورد تحلیل قرار دادند.

وانگ و همکاران [۱۲]، تاثیر پارامترهای طراحی بر رفتار دینامیکی سیکل رانکین آلی برای بازیافت حرارت اتلافی موتور را مورد بررسی قرار دادند. متغیرهای فشار تبخیری و تراکم، دمای خروجی و نوع سیال عامل بر عملکرد دینامیکی سیکل مورد پژوهش واقع شده‌اند. نتایج تحقیق نشان دهنده امکان به کارگیری کنترلر یکسان در شرایط طراحی مختلف برای هر سیال عامل است، اما با تغییر نوع سیال عامل، نوع کنترلر نیز بایستی مجدد طراحی و بروزرسانی گردد؛ همچنین هوان ژو و همکاران [۱۳]، آنالیز حساسیت پارامترهای عملیاتی بر عملکرد سیکل رانکین آلی و سیکل رانکین آلی با بازیافت با استفاده از روش آزمایش متعام را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. سه پارامتر دمای ورودی منبسط کننده، دمای خروجی کندانسور و طول کورس حرکتی پمپ به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر راندمان حرارتی سیکل، کار خروجی توربین، کار مصرفی پمپ و دبی جرمی سیال عامل معرفی شده است.

استفاده از روش طرح ریزی آزمایش‌ها و آنالیز واریانس یکی از راهکارهای ارائه پاسخ‌های جامع و قابل اطمینان آماری است که در بیشتر مسائل مهندسی و در اکثر رشته‌ها توسط سایر محققان بدان اشاره شده است. به طور نمونه مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تحلیل عملکرد مبدل‌های حرارتی با استفاده از روش تاگوچی در مطالعات زنگ و همکاران [۱۴] و ورما و همکاران [۱۵]، مورد بررسی قرار گرفت. کومار و همکاران [۱۶، ۱۷]، بهینه‌سازی پارامتری سیکل رانکین با استفاده از روش تاگوچی انجام دادند. محمد و همکاران [۱۸] از ابزار آماری آنالیز واریانس جهت ارزیابی نتایج و ایجاد رابطه بین خروجی‌های قدرت و معیارهای



شکل ۱- چیدمان پیشنهادی سیکل رانکین آلی

شده است. سیال عامل این سیکل تولوئن فرض شده است. فرض های زیر مبنای محاسبات آتی است:

- تمام فرآیندها آدیاباتیکی فرض شود.
- پمپ و توربین دارای بازده آیزنتروپیک می باشند.
- تمام فرآیندها جریان ثابت و حالت پایدار فرض شوند.

آهنگ جریان در تمام سیکل رانکین ثابت و بدون تغییر خواهد بود.

کار توربین بخار و پمپ به ترتیب طبق رابطه های (۱) و (۲) محاسبه می شود:

$$W_T = \dot{m}_{ORC}(h_1 - h_2) \quad (1)$$

$$W_P = \dot{m}_{ORC}(h_5 - h_4) \quad (2)$$

رابطه مبدل حرارتی از رابطه (۳) بدست می آید که سیال عامل به کمک حرارت داده شده تغییر فاز می دهد:

$$Q_H = \dot{m}_{ORC}(h_1 - h_6) \quad (3)$$

کندانسور به وسیله جریان خنک آب، سیال عامل سیکل رانکین را از فاز بخار به فاز مایع تبدیل می کند، این انتقال حرارت از طریق رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$Q_L = \dot{m}_{ORC}(h_3 - h_4) \quad (4)$$

با توجه به روابط (۱)-(۴) کار تولیدی سیکل رانکین را می توان به فرم کلی معادله (۵) ارائه کرد.

$$W_{net} = W_T - W_P \quad (5)$$

و راندمان حرارتی سیکل طبق رابطه (۶) تعریف می شود:

ورودی توربین، فشار کندانسور، افت فشار خطوط و تجهیزات و راندمان آیزنتروپیک پمپ و توربین روی راندمان حرارتی سیستم و حرارت ورودی سیکل برای سیال عامل تولوئن با استفاده از روش طرح ریزی آزمایش ها انجام شده است و در نهایت یک تابع پاسخ متشکل از پارامترهای موثر ارائه شده است. مزیت استفاده از تابع پاسخ، بکارگیری سریع و امکان بررسی تغییر همزمان پارامترهای موثر سیستم به منظور استفاده در سیستم های کنترلی سیکل است.

۲- بیان مسئله

۲-۱- روابط ترمودینامیکی حاکم در سیکل رانکین آلی

شرایط عملکردی، محیطی و هزینه ای سیگل رانکین آلی به شدت تحت تأثیر انتخاب سیال عامل است؛ در حالی که بیش از ۵۰ سیال عامل وجود دارد که در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند [۲۵ و ۲۶]، محدودیت هایی نیز وجود دارد که به خواص ترمودینامیکی، تأثیرات زیست محیطی، ایمنی، هزینه و در دسترس بودن سیالات مرتبط هستند. سیال عامل علاوه بر داشتن خواص ترمودینامیکی مورد نظر، باید در شرایط کار پایدار بوده و با مواد در تماس خورنده نباشد. یک عامل حیاتی در تصمیم گیری برای استفاده از سیال عامل پایداری حرارتی آن است [۹]. در کار حاضر سیال عامل سیکل رانکین آلی تولوئن در نظر گرفته شده است و دمای بحرانی نسبتاً بالا در حدود ۳۵۰ درجه سانتیگراد دارد [۲۷]. از نظر شیمیایی در این شرایط بالقوه عملیاتی پایدار است. از سوی دیگر طبق استاندارد طبقه بندی ایمنی 34 ASHRAE در خصوص خطرات زیست محیطی و سلامتی و ایمنی حین کار سیالات عامل، سیال تولوئن در دسته A3 قرار داده شده است [۲۶].

سیکل رانکین در شکل ۱ شامل یک مبدل حرارتی بوده که توسط حرارت داده شده سیال عامل سیکل رانکین را از فاز مایع به بخار تبدیل می کند، بخار ایجاد شده توربین بخار را به گردش واداشته و در ادامه در کندانسور از فاز بخار تبدیل به مایع می شود. در ادامه چرخه، پمپ فشار سیال را تقویت نموده و سیکل تکرار می شود. روابط ترمودینامیکی حاکم در سیکل رانکین آلی بسته که شامل توربین بخار، مبدل حرارتی، پمپ و کندانسور است، در این قسمت آورده

جدول ۱- پارامترهای اولیه سیکل رانکین آلی [۲۸]

مقدار	واحد	پارامترهای اولیه
۳۵۰	°C	دمای ورودی به توربین بخار
۲۵	bar	فشار ورودی به توربین بخار
۰/۱	bar	فشار کندانسور
۸۰	%	راندمان آیزنتروپیک توربین
۷۰	%	راندمان آیزنتروپیک پمپ
۱	%	افت فشار خطوط
۲۵	°C	دمای آب سرد ورودی به کندانسور
۱/۱	bar	فشار آب سرد ورودی به کندانسور
۱۰	°C	اختلاف دما در مبدل
۰/۰۳۶	kg/s	آهنگ جریان سیکل رانکین آلی
۰/۳۵۳	kg/s	آهنگ جریان آب ورودی به کندانسور

جدول ۲- مقایسه برخی پارامترها سیکل رانکین آلی نسبت به مرجع [۲۸]

پارامتر	واحد	سیستم حاضر	مرجع [۲۸]	درصد خطا
قدرت تولیدی توربین	kW	۷/۴۰۹	۷/۳۱۷	۱/۲۵
توان مصرفی پمپ	kW	۰/۱۵۷۸	۰/۱۵۶	۱/۱۵
قدرت خالص سیکل	kW	۷/۲۵۲	۷/۱۶۱	۱/۲۷
میزان حرارت دریافتی در مبدل	kW	۲۲/۰۲	۲۲/۱۹	۰/۷۷

بهینه می‌شود. در این روش، راهی جهت برآورد برهم کنش ها، تأثیرات درجه دوم و حتی سطح موضعی پاسخ با استفاده از طرح آزمایشی مناسب تعبیه شده است [۲۹]. پس از شبیه سازی عددی سیکل رانکین آلی در کد کامپیوتری توسط نرم‌افزار EES و اطمینان از صحت محاسبات لازم است که مدل ریاضی مناسبی برای بررسی نقش هر پارامتر مورد نظر تعیین شود. طرح مرکب مرکزی و باکس-بهینکن دو روش متفاوت برای متناسب سازی سطح پاسخ با در نظر گرفتن

$$\eta_{th} = \frac{(W_T - W_P)}{Q_H} \quad (6)$$

قابل ذکر است که در محاسبات طراحی بهینه سیکل، نسبت جرمی سیال کار سیکل تولید قدرت به آب خنک کن که بصورت زیر تعریف می‌شود، جز پارامترهای تأثیر گذار در نظر گرفته خواهد شد.

$$R_m = \frac{\dot{m}_{ORC}}{\dot{m}_{CW}} \quad (7)$$

۲-۲- اعتبارسنجی کد محاسباتی سیکل حاضر

با توجه به معادلات ارائه شده (۱)-(۶) کد محاسباتی سیکل رانکین آلی در نرم افزار EES نوشته شد و مقادیر عددی حاصل از کد محاسباتی بر مبنای مقادیر جدول ۱ با پژوهش [۲۸] مقایسه گردید که در جدول ۲ آورده شده‌اند.

۳- نتایج

۳-۱- انتخاب مدل مناسب در روش پاسخ سطح

جهت بررسی اثر پارامترهای ذکر شده روی توابع پاسخ راندمان حرارتی و حرارت ورودی سیکل از روش پاسخ سطح استفاده شده است که یکی از زیرمجموعه‌های فرآیند طرح ریزی آزمایش‌ها است. روش طرح ریزی آماری آزمایش‌ها عبارت است از آماده کردن برنامه‌های آزمایش برحسب یک الگوی آماری برقرار شده تا با موثرترین و با صرفه ترین طریق و با سازمان دادن و بهره گیری از نتایج آزمایش‌ها، هدف‌های تعیین شده برای آزمایش‌ها حاصل گردد. طرح‌ریزی آزمایش‌ها به منظور بهره گیری آماری از نتایج به وسیله تحلیل واریانس ابزار قوی برای پژوهش‌های علمی به شمار می‌آید. پیوند این دو تکنیک به محقق امکان می‌دهد که نتایج قابل ملاحظه‌ای بدست آورد [۲۹]. در مهندسی، بسیاری از پدیده‌ها بر اساس پاره‌ای از تئوری‌ها مدل سازی می‌شوند، به گونه‌ای که برخی از آنها به دلیل تعداد زیاد عوامل کنترل کننده، مکانیسم‌های ناشناخته یا پیچیدگی محاسباتی، توانایی داشتن مدل ریاضی را ندارند. روش سطح پاسخ، یکی از روش‌های شناسایی در طراحی آزمایش‌ها و علوم مرتبط با مهندسی است. در این روش مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری استفاده می‌شود که برای مدل سازی و تحلیل مسائل مفید است که در آن یک پارامتر پاسخ، تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد و در نهایت

ضریب قطعیت (R^2) سهم تغییرات کلی تشریح شده با مدل را اندازه گیری می کند که برای یک برازش خوب مقدار ضریب قطعیت باید نزدیک به ۱ و حداقل ۰/۸ باشد. R^2 تنظیم شده کمیتی آماری است که برای اندازه مدل تنظیم شده است. مقادیر بیش از ۰/۹ بیانگر آن است که مدل رگرسیون فرآیند را به خوبی شبیه سازی می کند. ضریب قطعیت به صورت معادله (۸) تعریف می شود و نشان دهنده کاهش تغییرات بر اثر استفاده از رگرسیون است.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (۸)$$

که در آن مجموع مربعات کلی (SS_{tot}) و مجموع مربعات باقیمانده ها (SS_{res}) در معادلات (۹) و (۱۰) آورده شده اند که در آن f_i, y و e به ترتیب مقادیر داده ها، مقادیر مدل پیشنهادی و باقیمانده می باشند [۲۹].

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (۹)$$

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2 = \sum_i e_i^2 \quad (۱۰)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (۱۱)$$

از نظر آماری، مدل های مناسب تر دارای انحراف استاندارد پایین تر می باشند. مطابق جدول شماره ۵، برای هر دو تابع پاسخ، انحراف استاندارد مدل طراحی مرکب مرکزی نسبت به مدل طراحی باکس-بهنکن پایین تر است. این واقعیت روی مقادیر R^2 و R^2 تنظیم و پیش بینی شده نیز تأثیر می گذارد. در این زمینه، مقادیر دقت مورد نیاز و R^2 پیش بینی شده مدل طراحی مرکب مرکزی برای هر دو پاسخ بالاتر از مدل طراحی باکس-بهنکن است.

از این رو، نتایج پیش بینی شده توسط روش طراحی مرکب مرکزی می تواند برای بررسی پارامترهای سیکل رانکین آلی و بهینه سازی استفاده شود.

برای تأیید صحت نتایج پیش بینی شده توسط روش طراحی مرکب مرکزی، از مقادیر میانی پارامترها و مقادیر مرجع [۲۸] استفاده شد که در جداول ۱ و ۲ بخش ۲-۲ ذکر شده است.

جزئیات در جدول ۶ نشان داده شده است. جدول ۶ درصد خطاهای راندمان حرارتی و حرارت ورودی سیکل

نقاط مختلف در فضای طراحی هستند. از این رو، این مدل ها اثرات متفاوتی از پارامترها را در پاسخ مشابه ارائه می دهند. انتخاب یک طرح آزمایشی اولین گام در این روش است؛ بنابراین ابتدا طرح مرکب مرکزی و باکس-بهنکن مقایسه می شوند که برای مناسب سازی معادلات درجه دوم استفاده می شوند. مرحله بعدی انتخاب متغیرهای مستقل و دامنه طراحی آنها است. جدول ۳ دامنه متغیرهای مستقل را برای تجزیه و تحلیل پارامترهای راندمان حرارتی سیکل (η_{th}) و حرارت ورودی (Q_h) به عنوان توابع پاسخ نشان می دهد. تجزیه و تحلیل واریانس، یک روش مناسب برای ارزیابی مدل پیشنهادی روش پاسخ سطح است. آنالیز رگرسیون غیرخطی با استفاده از داده های جمع آوری شده براساس دو روش مذکور برای پاسخ ها انجام پذیرفت.

مطابق آنالیز واریانس مدل های نشان داده شده در جداول ۴ و ۵، رویکردهای جالب توجه در مورد پارامترهای مختلف ظاهر می شود و مقادیر مختلف آنها در هر مدل طراحی قابل توجه است، با این وجود که مدل ها با استفاده از پارامترهای ورودی یکسانی ایجاد شده اند.

جدول ۳- پارامترهای مورد بررسی سیکل رانکین روی توابع پاسخ

فاکتور طراحی	پارامتر	واحد	مقدار کمینه (-)	مقدار بیشینه (+)
A	T_1	$^{\circ}C$	۳۰۰	۳۶۰
B	P_1	bar	۲۰	۲۸
C	P_3	bar	۰/۰۸	۰/۱۲
D	η_t	%	۷۰	۹۰
E	η_p	%	۶۰	۱۰۰
F	ΔP	%	۰/۵	۲
G	ΔT_{con}	$^{\circ}C$	۱۰	۲۵
H	\dot{m}_{ORC}	kg/s	۰/۰۳	۰/۲
J	T_{cool}	$^{\circ}C$	۲۰	۳۰
K	R_m	--	۰/۱	۰/۲۵

رانکین آلی را برای دو دسته از متغیرهای ورودی - مقادیر میانی محدوده های ارائه شده در جدول ۳ و مقادیر ارائه شده در مرجع [۲۸] (جدول ۲) - نسبت به مقادیر کد محاسباتی نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر آنالیز واریانس توابع پاسخ بدست آمده از دو روش طراحی مرکب مرکزی و باکس-بنکهن

روش طراحی مرکب مرکزی (CCD)				روش طراحی باکس-بنکهن (BBD)				
مدل	باقیمانده	کمبود تناسب	مقدار خطای خالص	مدل	باقیمانده	کمبود تناسب	مقدار خطای خالص	
۱۰۵/۹	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۹	۰	۱۰۳/۸۹	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۷۹	۰	مجموع مربعات
۳۱	۵۱۰	۵۰۱	۹	۱۸	۱۵۱	۱۴۲	۹	درجه آزادی
۳/۴۲	۷/۶۱E-۰۶	۷/۷۴E-۰۶	۰	۵/۷۷	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰	میانگین مربعات
۴/۴۹E+۰۵	-	-	-	۴۸۷۳۵/۶	-	-	-	ضریب فیشر- سندکر (F-value)
<۰/۰۰۰۱	-	-	-	<۰/۰۰۰۱	-	-	-	ضریب احتمال (p-value)
۵۶۷/۴۷	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۸	۰	۲/۷۷E+۰۵	۱۰۳۲/۴۲	۱۰۳۲/۴۲	۰	مجموع مربعات
۳۰	۵۱۱	۵۰۲	۹	۱۲	۱۵۷	۱۴۸	۹	درجه آزادی
۱۸/۹۲	۷/۴۹E-۰۶	۷/۶۳E-۰۶	۰	۲۳۰۸۹/۷	۶/۵۸	۶/۹۸	۰	میانگین مربعات
۲/۵۲E+۰۶	-	-	-	۳۵۱۱/۲۴	-	-	-	ضریب فیشر- سندکر (F-value)
<۰/۰۰۰۱	-	-	-	<۰/۰۰۰۱	-	-	-	ضریب احتمال (p-value)

راندمان حرارتی

حرارت ورودی

جدول ۵- داده‌های آماری روش‌های طراحی مرکب مرکزی و باکس بنکهن برای توابع پاسخ سیکل رانکین آلی

راندمان حرارتی (η_m)		حرارت ورودی (Q_{in})		
روش طراحی باکس-بنکهن (BBD)	روش طراحی مرکب مرکزی (CCD)	روش طراحی باکس-بنکهن (BBD)	روش طراحی مرکب مرکزی (CCD)	
۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۲۸	۲/۵۶	۰/۰۰۲۷	مقدار انحراف استاندارد
۵/۶	۳/۳۹	۷۴/۲۱	۳/۹۲	میانگین
۰/۹۹۹۸	۱	۰/۹۹۶۳	۱	R ²
۰/۹۹۹۸	۱	۰/۹۹۶	۱	Adjusted R ²
۰/۹۹۹۸	۱	۰/۹۹۵	۱	Predicted R ²
۹۵۷/۷۱۴۱	۲۳۶۲/۱۰۱	۲۴۳/۹۲۰۳	۵۰۴۷/۶۷۴	Adequate Precision

جدول ۶- مقادیر درصد خطای روش طراحی مرکب مرکزی برای توابع پاسخ سیکل رانکین آلی

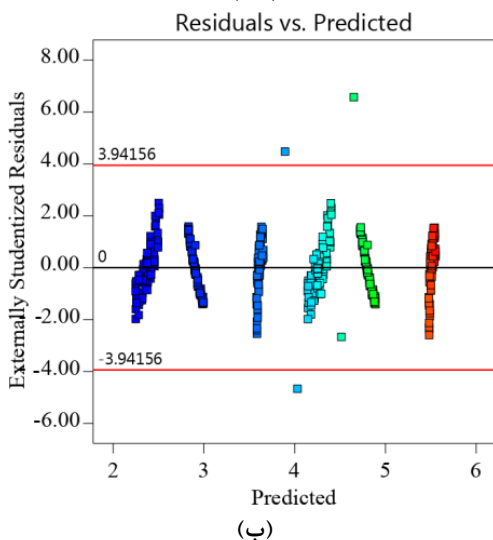
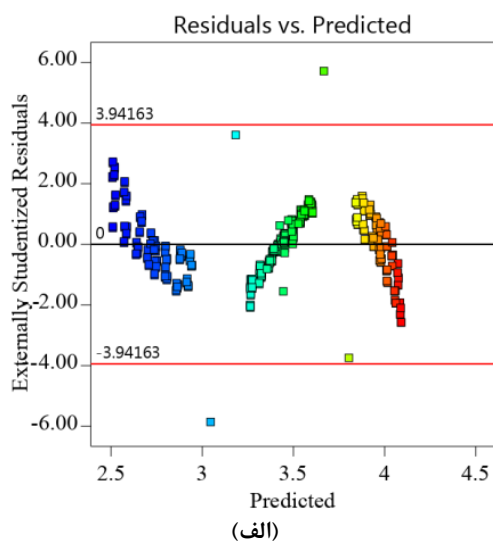
تابع پاسخ	مقدار حاصل از کد محاسباتی EES	مقدار بدست آمده از روش طراحی مرکب مرکزی	درصد خطا مطلق
راندمان حرارتی (%)	۳۱/۴۵۸۰	۳۱/۴۵۲۳	۰/۰۱۸
	۳۲/۹۳۴۹	۳۲/۸۰۲۷	۰/۴
حرارت ورودی (kW)	۷۰/۱۷۸	۷۰/۱۸۵۸	۰/۰۱۱
	۲۲/۰۱۸	۲۰/۷۲۰۱	۵/۹

همانطور که دیده می شود، خطاهای راندمان حرارتی و حرارت ورودی سیکل رانکین در روش طراحی مرکب مرکزی در محدوده قابل قبولی است.

۳-۲- بررسی اثرگذاری پارامترها

برای بررسی تاثیر پارامترهای جدول ۳ روی راندمان حرارتی سیکل و حرارت ورودی سیکل که به عنوان توابع پاسخ انتخاب شده اند، با استفاده از مدل آنالیز واریانس در روش طراحی مرکب مرکزی با کمک حذف رگرسیون پس گرد استفاده شد. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۲ بیانگر آن هستند که مقادیر باقیمانده ها بطور تصادفی توزیع می شوند و از الگوی منظم پیروی نمی کنند؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که تجزیه و تحلیل باقیمانده نشانگر کفایت مدل است و یا مدل به اندازه کافی برای پیش بینی پاسخها در سطح اطمینان ۹۵٪ مناسب است؛ همچنین در نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده ها اگر نقاط داده ها بر نمودار خیلی نزدیک به خط مستقیم باشند، آنگاه داده ها به طور نرمال توزیع شده اند؛ بنابراین همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، باقیمانده ها به طور نرمال و مشابه یک خط راست توزیع شده اند.

نتایج آنالیز واریانس به روش حذف رگرسیون پس گرد طرح اثر متقابل با توجه به داده های بدست آمده از کد محاسباتی، برای هر عملکرد در طرح مرکب مرکزی نشان می دهد که تغییرات در متغیرهای دارای شیب مثبت تندتر، رابطه مستقیم شدیدتری با عملکرد پاسخ دارند. به عنوان مثال، دمای ورودی و راندمان آیرنروپیک توربین و همچنین نسبت دبی جرمی تولوئن به آب خنک کن برای تابع پاسخ



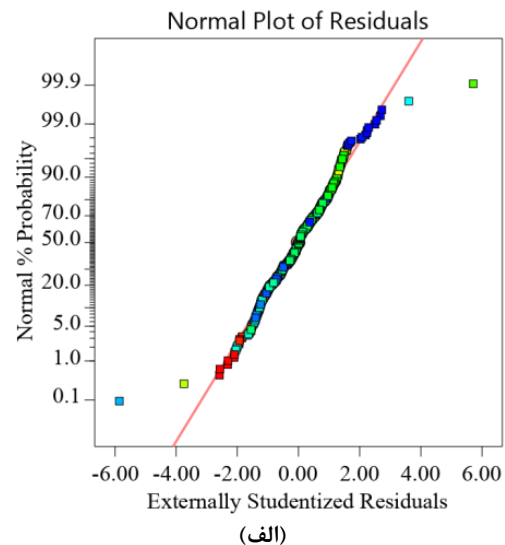
شکل ۲- نمودارهای توزیع مقادیر باقیمانده نسبت به مقادیر پیش بینی شده برای الف) راندمان حرارتی سیکل و ب) حرارت ورودی سیکل

تولون برای راندمان حرارتی و افزایش دمای آب ورودی خنک کن برای هر دو تابع پاسخ نسبت به پارامترهای دیگر کمترین تأثیر را داشته و در نتیجه می‌توان در مدل نهایی آن را نادیده گرفت. تجزیه و تحلیل واریانس مربوط به تابع پاسخ راندمان حرارتی و حرارت ورودی به سیستم بیانگر تأثیر تقابلی تمامی پارامترها است که از آن جمله با توجه به تأثیر زیاد راندمان آیزنتروپیک توربین برخی از تأثیرات به صورت کنتورهای سه بعدی قابل ارائه است.

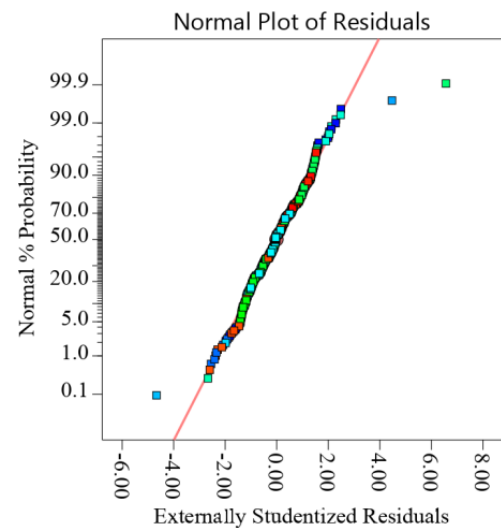
در ادامه بخشی از کنتورهای دوبعدی و سه بعدی حاصل برای تابع پاسخ راندمان حرارتی در شکل ۴ آورده شده است. قابل ذکر است که در محاسبات مربوطه، سایر پارامترها در مقدار میانی خود، ثابت فرض شده‌اند.

مطابق شکل ۴، تغییر پارامترهای ورودی در محدوده متغیرهای بررسی شده، منجر به تغییر راندمان حرارتی سیکل رانکین گردیده است. هرچند با توجه به نمودارها بیشترین نرخ افزایش در حضور افزایش پارامترهای راندمان آیزنتروپیک توربین، دما ورودی توربین و نسبت دبی جرمی‌ها قابل مشاهده است. از سوی دیگر همانگونه که در شکل‌های (۴-ه) و (۴-ح) قابل مشاهده است، افزایش اختلاف دمای آب خنک کننده در کندانسور منجر به کاهش راندمان حرارتی می‌گردد و تأثیر متغیرهای راندمان آیزنتروپیک پمپ، فشار ورودی به توربین و کندانسور با تأثیر مستقیم و مثبت به مقدار بسیار کمی منجر به افزایش راندمان حرارتی سیکل رانکین می‌شود.

با بررسی کنتورهای (۴-و)، (۴-ز) و (۴-ح) مشخص می‌شود که دبی سیال عامل در تغییر راندمان حرارتی نقش ندارد، ولی نسبت دبی جرمی سیال عامل به آب خنک کننده کندانسور سبب تغییرات زیادی در مقدار راندمان حرارتی سیکل خواهد شد. کاهش نسبت دبی جریان تولون به آب خنک کن کندانسور در صورتی که دبی جرمی تولون و سایر پارامترهای ورودی سیکل ثابت بماند، به معنی افزایش دبی جرمی آب خنک کن است، در نتیجه منجر به کاهش آنتالپی ورودی به اواپراتور می‌شود. از آنجایی که پارامترهای ورودی و خروجی توربین ثابت فرض شده‌اند، لذا این امر باعث افزایش حرارت ورودی به سیکل و نهایتاً منجر به کاهش راندمان حرارتی خواهد شد.



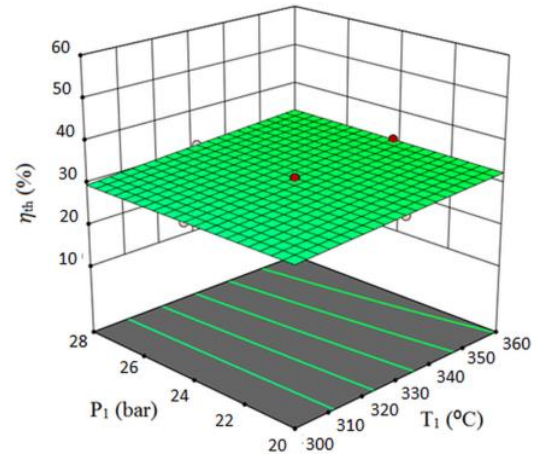
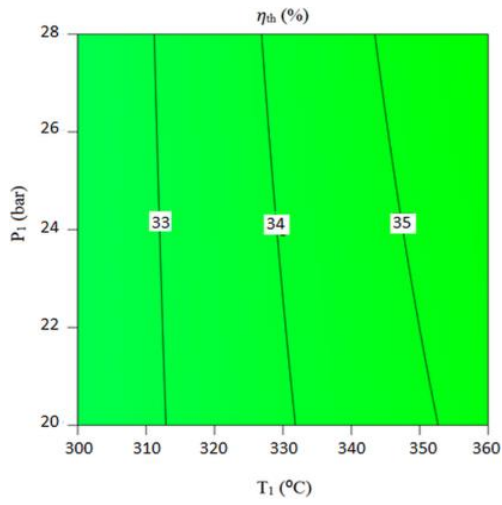
(الف)



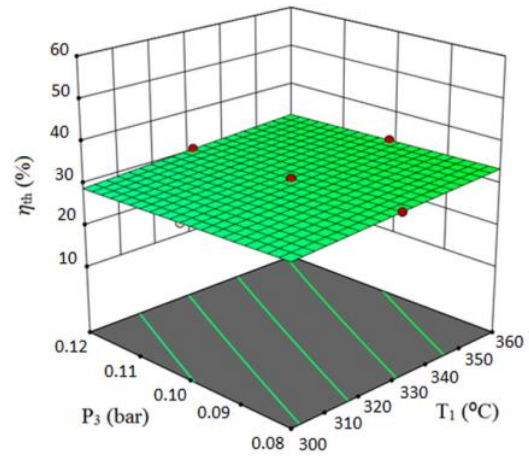
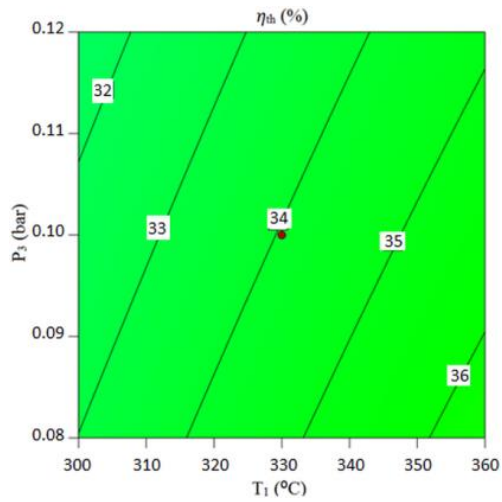
(ب)

شکل ۳- نمودارهای احتمال نرمال برای توابع پاسخ (الف) راندمان حرارتی سیکل و (ب) حرارت ورودی سیکل

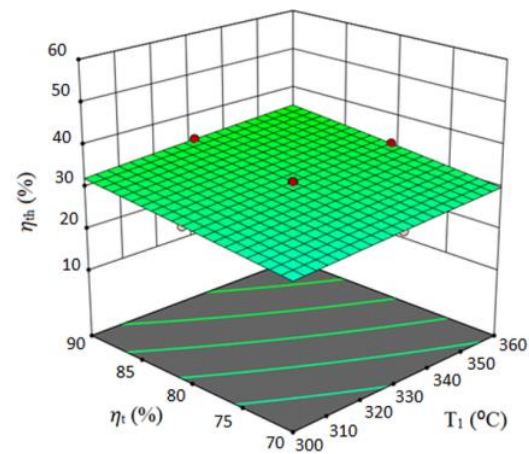
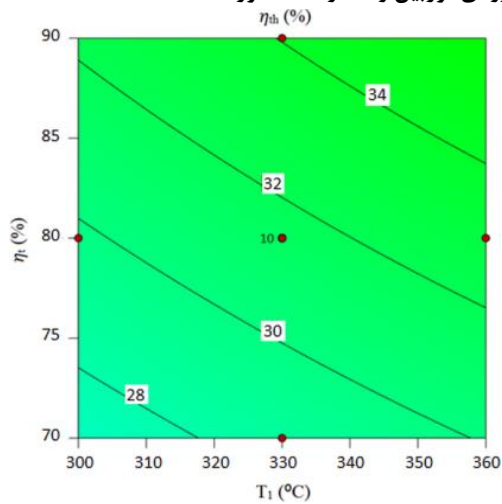
راندمان حرارتی و همچنین دبی جرمی سیال عامل سیکل و اختلاف دمای آب خنک کن برای تابع پاسخ حرارت ورودی دارای رابطه مستقیم می‌باشند. تغییرات در متغیرهای دارای شیب منفی تندتر، اثر معکوس بیشتری در عملکرد پاسخ دارند؛ به طوریکه افزایش اختلاف دما در ورودی و خروجی آب خنک کن و نسبت دبی جرمی به ترتیب برای توابع پاسخ راندمان حرارتی و حرارت ورودی تأثیر منفی دارند. از سوی دیگر پارامترهای با حداقل شیب نشان دهنده کمترین تأثیر می‌باشند. با توجه به تجزیه و تحلیل واریانس دبی جرمی



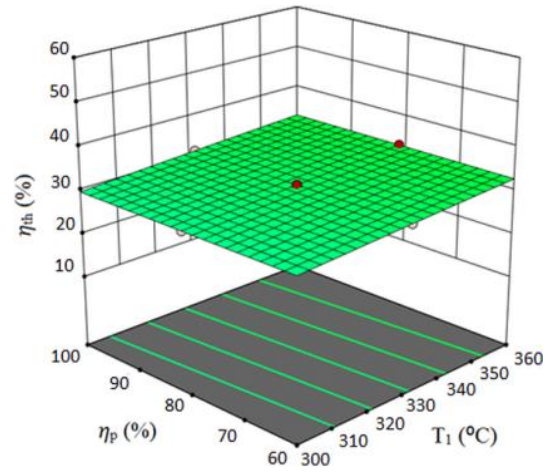
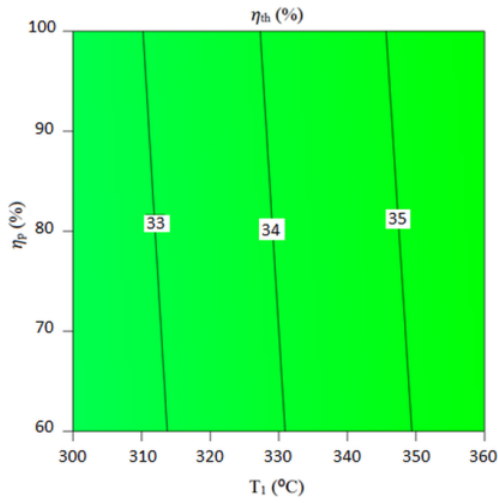
(الف) تغییرات راندمان حرارتی با دما و فشار ورودی به توربین



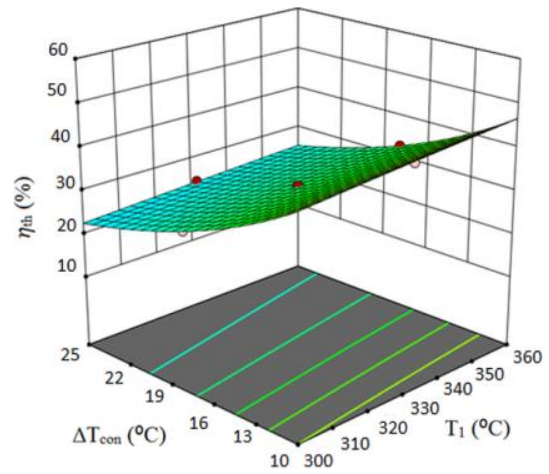
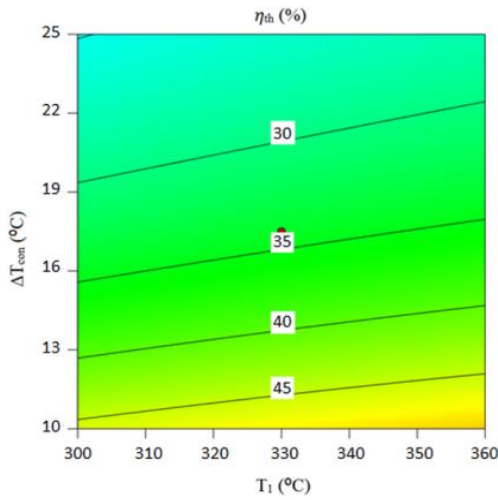
(ب) تغییرات راندمان حرارتی با دمای ورودی توربین و فشار کندانسور



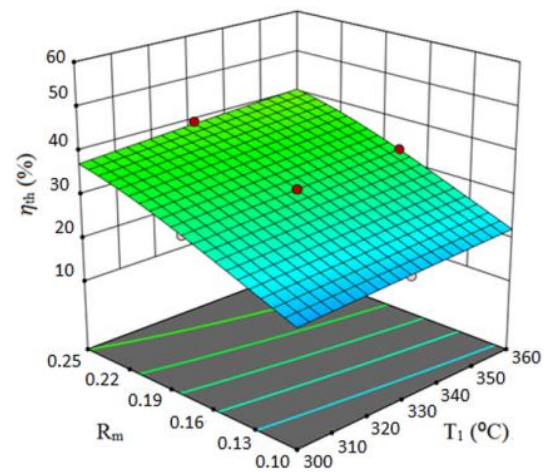
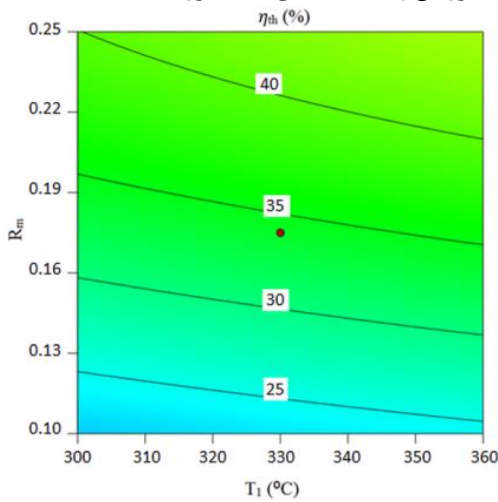
(ج) تغییرات راندمان حرارتی با دمای ورودی و راندمان آیزنتروپیک توربین



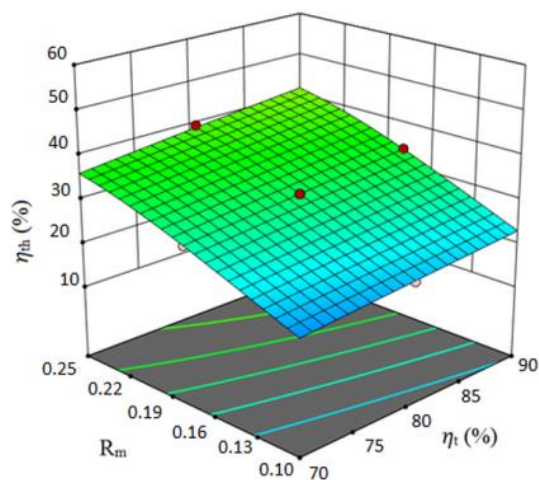
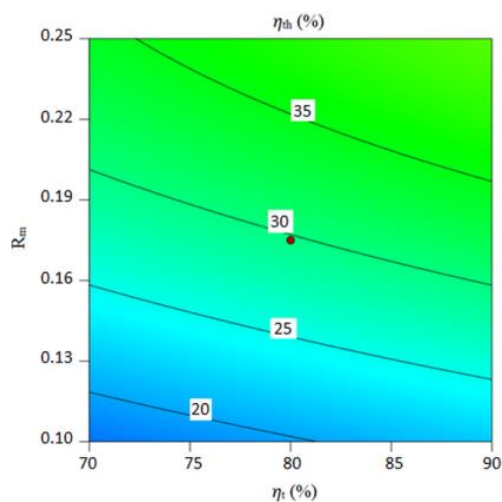
(د) تغییرات راندمان حرارتی با دمای ورودی توربین و راندمان آیزنتروپیک پمپ



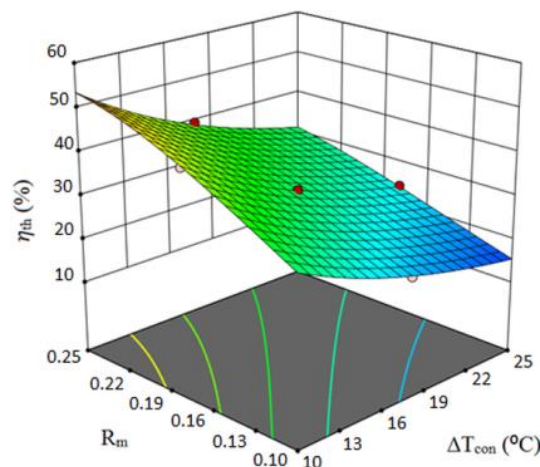
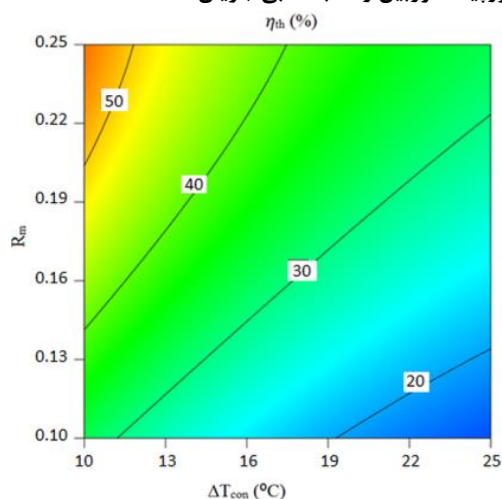
(هـ) تغییرات راندمان حرارتی با دمای ورودی به توربین و اختلاف دمای کندانسور



(و) تغییرات راندمان حرارتی با دمای ورودی به توربین و نسبت دبی جریان



(ز) تغییرات راندمان حرارتی با راندمان آیزنتروپیک توربین و نسبت دبی جریان



(ح) تغییرات راندمان حرارتی با اختلاف دمای کندانسور و نسبت دبی جریان

شکل ۴- کنتورهای دو بعدی و سه بعدی تاثیر دوگانه برخی پارامترهای موثر بر راندمان حرارتی سیکل

مدل طراحی مرکب مرکزی برای هر دو پاسخ بالاتر از مدل طراحی باکس-بهنگن است که نشان دهنده برازش مناسب مدل طراحی مرکب مرکزی روی توابع پاسخ است. همانگونه که نتایج پیش بینی کرده‌اند، بیشترین نرخ افزایش راندمان حرارتی در حضور ازدیاد مقادیر پارامترهای راندمان آیزنتروپیک توربین، دما ورودی توربین و نسبت دبی جرمی جریان تولوئن به آب خنک کن کندانسور قابل مشاهده است. از سوی دیگر افزایش اختلاف دمای آب خنک کننده در کندانسور، منجر به کاهش راندمان حرارتی می‌شود و تاثیر متغیرهای راندمان آیزنتروپیک پمپ، فشار ورودی به توربین و کندانسور با تاثیر مستقیم و مثبت به

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

به طور کلی عملکرد سیکل رانکین آلی با سیال عامل تولوئن تابع پارامترهای ورودی بسیاری است. تاثیر برخی از این متغیرها از قبیل، دما و فشار ورودی به توربین، راندمان آیزنتروپیک آن، فشار ورودی به پمپ و راندمان آیزنتروپیک پمپ، میزان افت فشار داخل خطوط و همچنین متغیرهای عملکردی خنک کن روی راندمان حرارتی و حرارت ورودی سیکل با استفاده از روش پاسخ سطوح بر مبنای مقایسه دو مدل طراحی مرکب مرکزی و باکس-بهنگن انجام و با انتخاب مدل طراحی مرکب مرکزی بررسی شده است. در این زمینه، مقادیر دقت مورد نیاز و R^2 پیش بینی شده و تنظیم شده

۶- مراجع

- [1] Obernberger I, Thonhofer P, Reisenhofer E (2002) Description and evaluation of the new 1,000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria. Euroheat & Power 10(1): 18-25.
- [2] Ferreira P, Catarino I, Vaz D (2017) Thermodynamic analysis for working fluids comparison in Rankine-type cycles exploiting the cryogenic exergy in Liquefied Natural Gas (LNG) regasification. Appl Therm Eng 121: 887-896.
- [3] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, Fischer J (2007) Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. Energy 32(7):1210-1221.
- [4] Habibzadeh A, Rashidi M (2016) Thermodynamic analysis of different working fluids used in organic rankine cycle for recovering waste heat from GT-MHR. JESTEC 11(1): 121-135.
- [5] Chacartegui R, Sánchez D, Muñoz J, Sánchez T (2009) Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants. Appl Energy 86(10): 2162-2170.
- [۶] شوکتی ن، رنجبر س ف (۱۳۹۴) تحلیل ترمودینامیکی و اگزورژواکونومیکی ترکیب سیکل تولید توان زمین گرمایی با سیکل کالینا و سیکل رانکین با سیال‌های آلی مختلف. مجله مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها ۱۹۲-۱۷۷: ۵(۱).
- [7] Aboelwafa O, Fateen SEK, Soliman A, Ismail IM (2018) A review on solar Rankine cycles: Working fluids, applications, and cycle modifications. Renew Sustain Energy Rev 82: 868-885.
- [۸] چهارطاقی م، بابایی م (۱۳۹۳). تحلیل انرژی و اگزورژی سیکل ارگانیک رانکین با به کارگیری سیال کاری دو جزیی در شرایط مشخص منبع حرارتی. مهندسی مکانیک مدرس ۱۵۶-۱۴۵: ۱۴(۳)
- [9] Badr O, Probert S, O'callaghan P (1985) Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine. Appl Energy 21(1):1-42.
- [10] Mahmoudi A, Fazli M, Morad M (2018) A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle, Appl. Therm. Eng. 143: 660-675.
- [۱۱] باروتکوب ح، حنیفی میانگفشه ک، یاری م (۱۳۹۶) طراحی و تحلیل سیستم جدید سیکل رنکین آلی با محرک اولیه توربین گاز-SGT ۴۰۰ مطالعه موردی: منطقه نار- کنگان (جنوب ایران). مهندسی مکانیک مدرس ۳۶۱-۳۷۲: ۱۷(۱۲).
- [12] Wang X, Shu G, Tian H, Liu P, Jing D, Li X (2018) The effects of design parameters on the dynamic behavior of organic ranking cycle for the engine waste heat recovery. Energy 147: 440-450.

مقدار بسیار کمی منجر به افزایش راندمان حرارتی سیکل رانکین آلی می‌شود.

در نهایت بهینه سازی عددی با توجه به شرایط عملیاتی سیکل‌های واقعی بر مبنای تابع مطلوبیت و رویه پاسخ مرکب مرکزی، نشان دهنده حصول راندمان نزدیک به ۳۶٪ به ازای حرارت ورودی نزدیک به ۱۳۰kW است.

۵- فهرست علائم

گرمای ویژه، kJ/kgK	c_p
آنتالپی، kJ/kg	h
آهنگ جریان جرم، kg/s	\dot{m}
فشار، bar	P
انرژی گرمایی، kW	Q
نسبت دبی جرمی	R_m
باقیمانده	R
دما، $^{\circ}C$	T
کار، kW	W
علائم یونانی	
بازده، %	η
زیر نویس‌ها	
دما بالا	H
دما پایین	L
پمپ	P
توربین	T
گرمایی	Th
سیکل رانکین آلی	ORC
آب خنک کن	CW

- [22] Okati V, Behzadmehr A, Farsad S (2016) Analysis of a solar desalinator (humidification–dehumidification cycle) including a compound system consisting of a solar humidifier and subsurface condenser using DoE. *Desalination* 397: 9-21.
- [۲۳] مهرور ع، باستی ع، جمالی ع (۱۳۹۶) بهینه سازی چند هدفه پارامترهای ماشین کاری الکتروشیمیایی با استفاده از روش سطح پاسخ. *مجله مکانیک سازه ها و شاره ها* ۷(۴): ۴۹-۶۰.
- [۲۴] پیرمحمد س، اسماعیلی مرزدشتی س (۱۳۹۶) مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه های چند جداره مربعی و دایروی با استفاده از روش کپراس و بهینه سازی سازه دایروی با استفاده از روش سطح پاسخ. *مجله مکانیک سازه ها و شاره ها* ۷(۳): ۱۳۳-۱۴۷.
- [25] Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK (2010) A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renew. Sustain. Energy Rev* 14(9): 3059-3067.
- [26] Douvartzides S, Karmalis I (2016) Working fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) exhaust heat recovery of an internal combustion engine power plant. *Iop Conf Ser-Mat Sci* 161(1): 012087.
- [27] Invernizzi CM, Iora P, Manzolini G, Lasala S (2017) Thermal stability of n-pentane, cyclopentane and toluene as working fluids in organic Rankine engines. *Appl Therm Eng* 121: 172-179.
- [28] Mohammadi A, Kasaeian A, Pourfayaz F, Ahmadi MH (2017) Thermodynamic analysis of a combined gas turbine, ORC cycle and absorption refrigeration for a CCHP system. *Appl Therm Eng* 111: 397-406.
- [29] Montgomery DC (2017) Design and analysis of experiments. 9th edn. Wiley, New York.
- [13] Xi H, Zhang H, He YL, Huang Z (2019) Sensitivity analysis of operation parameters on the system performance of organic rankine cycle system using orthogonal experiment. *Energy* 172: 435-442.
- [14] Zeng M, Tang L, Lin M, Wang Q (2010) Optimization of heat exchangers with vortex-generator fin by Taguchi method. *Appl Therm Eng* 30(13): 1775-1783.
- [15] Verma V, Murugesan K (2014) Optimization of solar assisted ground source heat pump system for space heating application by Taguchi method and utility concept. *Energ Buildings* 82: 296-309.
- [16] Kumar U, Karimi M.N (2014) Application of Taguchi's methods for optimizing organic rankine cycle for recovering low grade industrial waste heat. *IJTEE* 8(2): 91-101.
- [17] Kumar U, Karimi MN, Asjad M (2016) Parametric optimisation of the organic Rankine cycle for power generation from low-grade waste heat. *Int J Sustain Energy* 35(8): 774-792.
- [18] Mohammed MK, Awad OI, Rahman M, Najafi G, Basrawi F, Alla ANA, Mamat R (2017) The optimum performance of the combined cycle power plant: A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev* 79: 459-474.
- [19] Bademlioglu A, Canbolat A, Yamankaradeniz N, Kaynakli O (2018) Investigation of parameters affecting Organic Rankine Cycle efficiency by using Taguchi and ANOVA methods. *Appl Therm Eng* 145: 221-228.
- [20] Goyal A, Sherwani AF, Tiwari D (2021) Optimization of cyclic parameters for ORC system using response surface methodology (RSM). *Energy Source Part A* 43(8): 993-1006.
- [۲۱] محمدی م، ارغوانی هادی ج (۱۳۹۵) مدل سازی یک بعدی و بهینه سازی پرتابگرگازی دومرحله ای به روش سطح پاسخ. *مهندسی مکانیک مدرس* ۱۳۹-۱۲۹: ۱۶(۲).