





موسسه آموزش عالی انرژی  
دانشکده فنی و مهندسی  
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد  
مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی

عنوان:

# مدل سازی و بهینه سازی بازدهی توربین در نیروگاه های سیکل ترکیبی

اساتید راهنما:

دکتر حسین تمیم

دکتر یوسف یاسی

پژوهشگر:

بهزاد ملکی

پاییز ۱۳۹۷



## حوزه معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی موسسه آموزش عالی انرژی

### تعهدنامه اصالت پایان نامه

اینجانب بهزاد ملکی دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد ناپیوسته در رشته مهندسی مکانیک که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۷/۲۲ از پایان‌نامه خود با عنوان **مدل سازی و بهینه سازی بازدهی توربین در نیروگاه های سیکل ترکیبی** با کسب نمره ۱۷/۵۰ و درجه بسیار خوب دفاع نموده‌ام بدین وسیله اعتراف می‌کنم:

(۱) این پایان‌نامه حاصل تحقیق و پژوهش اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان‌نامه، کتاب، مقاله و ...) استفاده کرده‌ام، مطابق ضوابط موجود، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست منابع ذکر و درج نموده‌ام.

(۲) این پایان‌نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح، پایین‌تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی داخلی و خارجی ارائه نشده‌است.

ضمناً متعهد می‌شوم:

(۳) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هر گونه بهره‌برداری اعم از چاپ مقاله، کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان‌نامه را داشته باشم، از استاد محترم راهنما و گروه آموزشی مربوطه مجوزهای لازم را اخذ نمایم.

(۴) چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن را بپذیرم و موسسه آموزش عالی انرژی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی‌ام، هیچگونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی: بهزاد ملکی  
تاریخ و امضاء:

## تقدیم به:

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بی کران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم  
به :

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم

پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی ایستادگی را تجربه نمایم.  
مادرم، دریایی بیکران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم  
همه مهر.

پروردگارا نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شده سیاه کنم و نه برای  
دست های پینه بستشان مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و  
ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

و به همسرم، استطوره ی زندگی ام، پناه خستگی ام و امید بودنم.  
پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

## سازگاری:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم.

با تشکر از اساتید بزرگوارم که شایسته هر نوع سپاس، تجلیل و تکریم اند:

جناب آقای دکتر حسین تمیم و جناب آقای دکتر یوسف یاسی اساتید راهنمای ارجمند که با ایجاد عشق به نوشت، صبورانه، با ارایه ی رهنمودها، انتقادها و پیشنهاد هایشان، در پایان نامه مرا حمایت و تشویق نمودند و با نظر های اصلاحی ارزنده خود، ضمن دلگرمی بنده، موجب تکمیل این اثر شدند.

## چکیده

### مدل سازی و بهینه سازی بازدهی توربین در نیروگاه های سیکل ترکیبی

در این پژوهش در گام اول مدلسازی حالت پایه سیکل آبخاری فشار بالا و فشار پایین تحت شرایط ترمودینامیکی خاص صورت میگیرد در وهله دوم مساله بهینه سازی مطرح میگردد و در وهله سوم مطابق نمودار شکل زیر آنالیز حساسیت برای متغیرهای مستقل انجام میگردد.

مقادیر بهینه توابع بهینه به کمک الگوریتم ژنتیک محاسبه گردید. مقدار بیشینه برای توابع هدف توان و اگزرژی به ترتیب برابر با ۷۶ کیلووات و ۹۰/۶٪ بدست آمد مقدار راندمان قانون اول در این حالت ۲۶ درصد بدست آمد. مقادیر بیشینه به ازای شرایط عملیاتی زیر بدست آمده است.

نتایج بهینه سازی افزایش ۳ درصدی در بازده حرارتی را نشان می دهند سیکل انتخاب شده توانایی بازیافت حرارت را داشته و میتواند ۷۶ کیلووات با راندمان ۲۷ درصد تولید کند راندمان اگزرژی در این حالت به ۹۱ درصد میرسد.

با افزایش در مقدار  $T_{3t}$  زمانیکه دمای تبخیر ثابت است، راندمان حرارتی تقریباً ثابت می ماند و افزایش و کاهش بیشتر از دو درصد نخواهد داشت. خط قرمز از اتصال نقاط ماکزیمم نمودارها به یکدیگر بدست می آید در دمای  $T_{3t}$  ثابت با افزایش دمای تبخیر  $T_{3s}$  مقدار راندمان افت میکند.

کلمات کلیدی: سیکل ORC – بهینه سازی – راندمان اگزرژی – قانون دوم ترمودینامیک

## فهرست مطالب

### صفحه

### عنوان

#### فصل اول: مقدمه پژوهش

۲	۱-۱- مقدمه.....
۶	۲-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق.....
۶	۳-۱- هدف تحقیق.....
۷	۴-۱- بیان مساله.....
۸	۱-۴-۱- بهینه سازی.....
۸	۱-۱-۴-۱- تابع هدف.....
۹	۲-۱-۴-۱- متغیرهای مستقل.....
۱۰	۵-۱- فرضیات پژوهش.....
۱۱	۶-۱- مزایا و معایب سیکل رانکین آلی.....
۱۱	۷-۱- ملاحظات دربارۀ سیال آلی انتخابی.....
۱۳	۸-۱- سیکل رانکین آلی بازیاب.....
۱۵	۱-۸-۱- توربین، فرآیند (۲-۱).....
۱۶	۲-۸-۱- مبدل حرارتی بازیاب، فرآیند (۳-۲ و ۵-۶).....
۱۶	۳-۸-۱- کندانسور (۳-۴).....
۱۷	۴-۸-۱- پمپ، فرآیند (۴-۵).....
۱۷	۵-۸-۱- بویلر فرآیند (۶-۱).....

#### فصل دوم: مطالعات گذشته

۲۰	۱-۲- مقدمه.....
----	-----------------

#### فصل سوم: الگوریتم بهینه کننده

۲۸	۱-۳- الگوریتم های بهینه سازی.....
۲۹	۲-۳- دسته بندی الگوریتم های فراابتکاری.....
۳۰	۳-۳- تاریخچه الگوریتم ژنتیک.....
۳۱	۱-۳-۳- تعریف الگوریتم ژنتیک و مفهوم آن.....
۳۲	۲-۳-۳- روند اجرا در الگوریتم ژنتیک.....
۳۴	۳-۳-۳- اصطلاحات کاربردی در الگوریتم ژنتیک.....
۳۴	۱-۳-۳-۳- تابع هدف (تابع شایستگی).....
۳۵	۲-۱-۳-۳- مثال برای فهم بهتر روند کار در الگوریتم ژنتیک.....
۳۵	۲-۳-۳-۳- جمعیت و نسلها.....
۳۶	۳-۳-۳-۳- والدین و فرزندان.....
۳۶	۴-۳-۳- عملکرد الگوریتم ژنتیک.....
۳۷	۱-۴-۳-۳- عملگر ترکیب (تلفیق).....

۳۸	..... ۳-۴-۲-جهش
۴۰	..... ۳-۳-۵-توابع عملیاتی الگوریتمهای ژنتیک
۴۱	..... ۳-۳-۶-مزایای الگوریتم ژنتیک
۴۳	..... ۳-۳-۷-محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک
۴۴	<b>فصل چهارم: مدلسازی</b>
۴۵	..... ۴-۱-مقدمه
۴۵	..... ۴-۲-پیکربندی سیکل
۴۷	..... ۴-۳-معادلات حاکم
۴۷	..... ۴-۳-۱-سیکل اول
۴۸	..... ۴-۳-۲-سیکل دوم
۴۸	..... ۴-۳-۳-فرضیات مدلسازی
۴۹	..... ۴-۳-۴-ترکیب آبخاری سیکل اول و دوم
۴۹	..... ۴-۴-اطلاعات و داده های ورودی
۵۰	..... ۴-۵-نتایج
۵۵	..... ۴-۶-بهینه سازی دو هدفه
۵۸	<b>فصل: پنجم جمع بندی</b>
۵۹	..... ۵-۱-جمع بندی
۵۹	..... ۵-۲-پیشنهادهای آینده
۶۰	..... مراجع



## فهرست شکل ها

### صفحه

### عنوان

۳	شکل (۱-۱) شماتیک یک چرخه سیکل رانکین.....
۴	شکل (۲-۱) هزینه تولید قدرت به کمک تکنولوژی های مختلف.....
۴	شکل (۳-۱) دیاگرام T-S ایده آل یک چرخه رانکین آلی.....
۸	شکل (۴-۱) بخش های اصلی هر نوع مساله بهینه سازی در علوم مهندسی.....
۹	شکل (۵-۱) تابع هدف مورد بررسی در این پژوهش.....
۱۰	شکل (۶-۱) متغیرهای مستقل مساله بهینه سازی.....
۱۲	شکل (۷-۱) نمودار T-S انواع سیالات آلی.....
۱۴	شکل (۸-۱) نمودار T-S سیکل رانکین آلی بازیاب.....
۲۳	شکل (۱-۲) راندمان حرارتی بر حسب نسبت فلوی حجمی خروجی به ورودی توربین.....
۲۹	شکل (۱-۳) دسته بندی الگوریتم های تقریبی.....
۳۳	شکل (۲-۳) فلوچارت الگوریتم ژنتیک و روند کار آن در حل مسایل مختلف بهینه سازی.....
۳۴	شکل (۳-۳) اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک.....
۳۵	شکل (۴-۳) در شکل بالا مفهوم نفر و جمعیت و نسل به خوبی نشان داده شده است.....
۳۶	شکل (۵-۳) تعاریف نفر جمعیت و نسل والدین و فرزندان.....
۳۷	شکل (۶-۳) عملگر ترکیب (تلفیق) برای تولید یک فرزند از دو والد شایسته.....
۳۸	شکل (۷-۳) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم.....
۳۸	شکل (۸-۳) عملگر جهش برای تولید یک فرزند از یک والد شایسته.....
۳۹	شکل (۹-۳) تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم.....
۴۵	شکل (۱-۴) مراحل مختلف پیاده سازی در این پژوهش.....
۴۶	شکل (۲-۴) پیکربندی سیکل آبشاری (رانکین -برایتون) ترکیبی با منبع حرارتی اگزاست توربین.....
۴۷	شکل (۳-۴) نمودار تدا بر حسب آنترופی برای چرخه برایتون.....
۵۰	شکل (۴-۴) بازده حرارتی قانون اول بر حسب دمای T3s و T3t.....
۵۱	شکل (۵-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور در دبی ثابت.....
۵۱	شکل (۶-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و دبی جرمی در فشار اواپراتور ثابت.....
۵۲	شکل (۷-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دبی جرمی و فشار اواپراتور در دما اگزاست ثابت.....
۵۲	شکل (۸-۴) نمودار راندمان حرارتی قانون اول بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور در دبی جرمی ثابت.....
۵۳	شکل (۹-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور.....
۵۳	شکل (۱۰-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور.....
۵۴	شکل (۱۱-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور.....
۵۴	شکل (۱۲-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور.....
۵۵	شکل (۱۳-۴) نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور.....
۵۶	شکل (۱۴-۴) توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه.....
۵۷	شکل (۱۵-۴) توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه.....

## فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۱) خواص سیالات آلی انتخابی با منابع گرمایی دما پایین.....	۱۳
جدول (۱-۴) توابع هدف درصد حذف و شار عبوری و متغیرهای مستقل.....	۵۶
جدول (۲-۴) مقادیر بهینه بهینه سازی دو هدفه.....	۵۶

## **فصل اول**

### **مقدمه پژوهش**

## ۱-۱- مقدمه

سالها پیش با افزایش تقاضای برق، نیروگاههای حرارتی در سطح جهان گسترده شدند. این نیروگاهها که اکثراً از سوخت های فسیلی به عنوان سوخت بهره می بردند تنها با هدف تولید برق به کار گرفته میشدند. با افزایش قیمت نفت و عدم دسترسی بسیاری از کشورها به این منبع انرژی زوال پذیر، دولت ها به فکر افزایش بازده نیروگاه یا افزایش بهره وری انرژی افتادند.

در این مسیر کارهای متفاوتی میتوانست انجام شود از جمله ساخت نیروگاههای ترکیبی گازی و بخار، یا کوپل کردن نیروگاه با هر وسیله دیگری که نیاز به حرارت داشته باشد. دمای خروجی بسیاری از واحدهای صنعتی در حدود ۴۰۰ درجه سانتی گراد و یا کمتر می باشد و اگر این حرارت به صورت مستقیم و بدون بازیافت حرارت وارد محیط شود موجب گرمایش محیط زیست خواهد شد. سیکل های رانکین آلی قابلیت های بالایی در بازیافت چنین حرارت هایی را دارا می باشند.

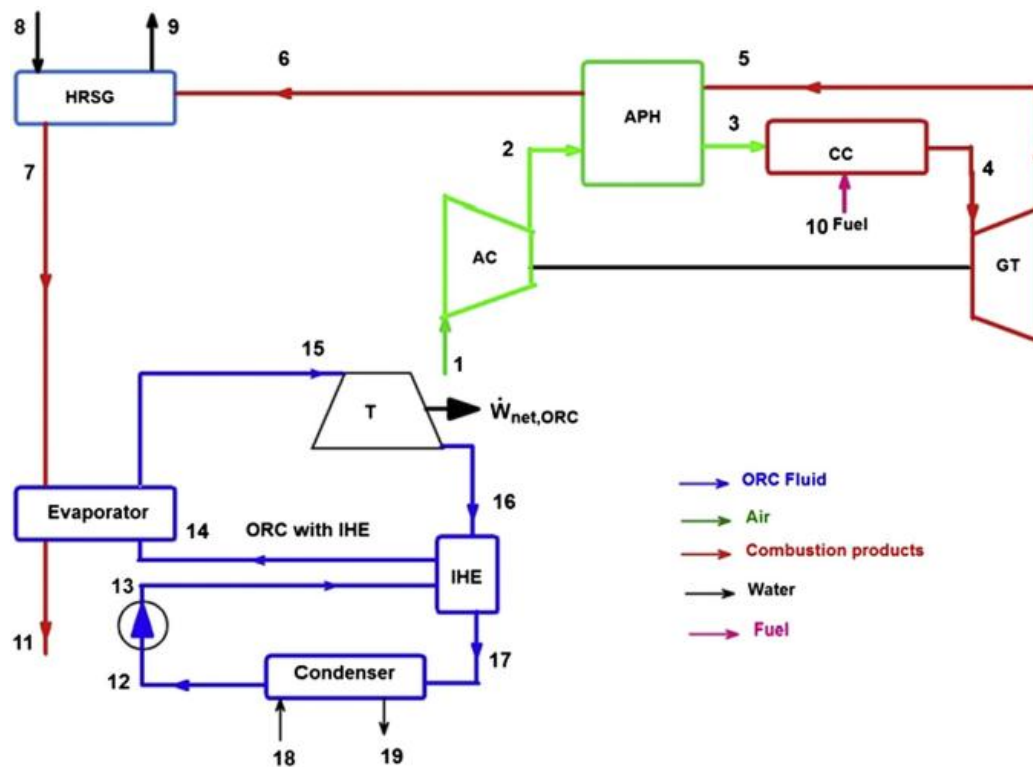
از طرف دیگر این سیکل ها دارای ایمنی بالایی بوده و از نیازهای تعمیراتی پایینی برخوردار می باشند. ترکیب سیکل های رانکین آلی با سیستم های انرژی دیگر همچون انرژی های خورشیدی و یا سیستم های بازیافت انرژی اتلافی و زمین گرمایی باعث افزایش بازدهی کلی سیکل خواهد شد. از آنجایی که سیکل های رانکین آلی به صورت طبیعی و بدون مصرف سوخت، با استفاده از حرارت هدر رفته سیکل های دیگر کار می کنند آلودگی محیط زیستی کمتری در مقایسه با سیکل های دیگر خواهند داشت.

به منظور اطمینان از تولید انرژی بدون آلودگی محیط زیست، تکنولوژی های نوین تبدیل انرژی لازم هستند. از بین آنها، منابع گرمایی دما پایین یا منابع گرمایی با قدرت پایین، پتانسیل بالایی برای توسعه دارند. سیکل رانکین آلی<sup>۱</sup> از اوایل دهه ۱۹۸۰ بعنوان یک تکنولوژی خوب شناخته شده است. تاکنون تعداد زیادی از نیروگاه های با سیکل رانکین آلی ساخته شده اند که اغلب، برای کاربردهای خورشیدی، زمین گرمایی، بازیابی گرمای تلف شده و

---

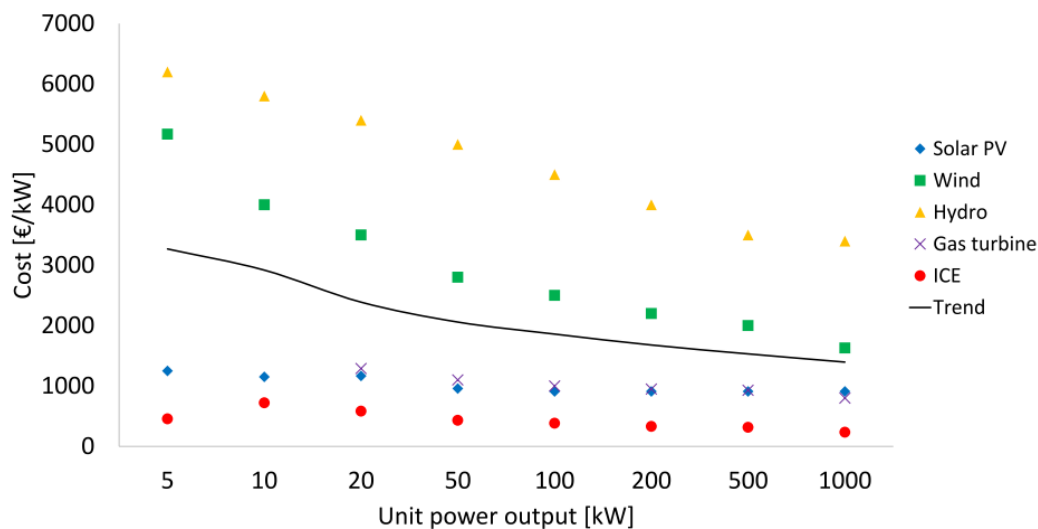
<sup>۱</sup> Organic Rankine Cycle (ORC)

سیستمهای تولید همزمان گرما و توان می‌باشند. این فناوری مزیت‌های بیشتری نسبت به سیکل رانکین بخار رایج دارد که آن را علیرغم داشتن بازده پایین، برای نیروگاه‌های توان قدرت با خروجی محدود (کمتر از یک مگاوات)، مناسب می‌سازد. در شکل‌های زیر شماتیک یک سیکل رانکین آلی ترکیب شده با توربین گاز نشان داده شده است.



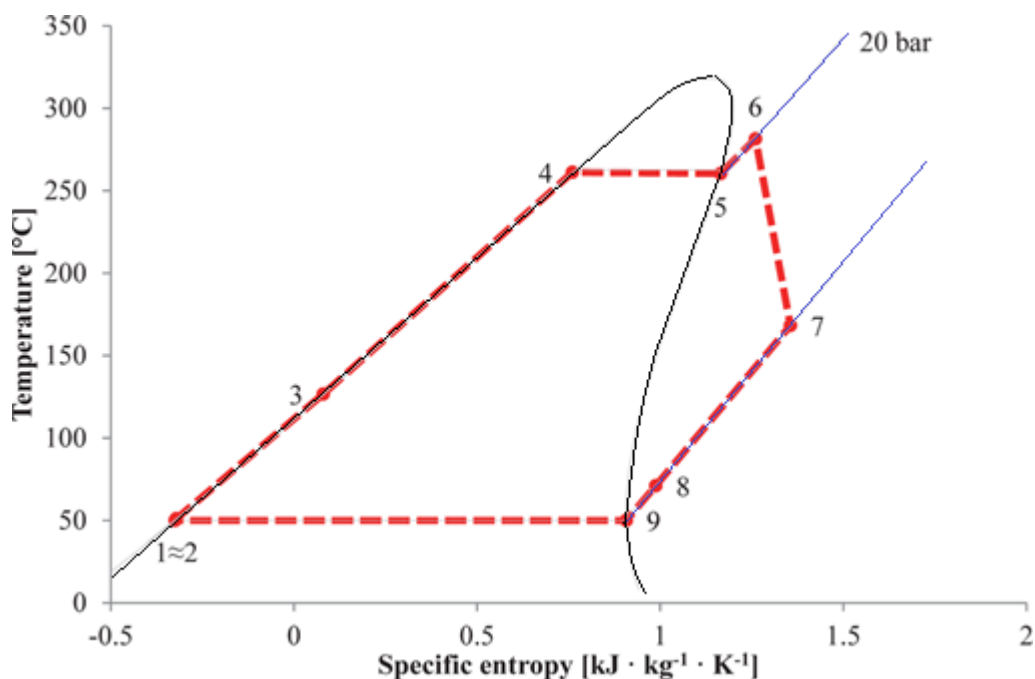
شکل ۱-۱- شماتیک یک چرخه سیکل رانکین که انرژی مورد نیاز برای تبخیر سیال عامل هیدرو کربنی را از انرژی اتلافی خروجی اگزاست توربین گاز تامین میکند [۱]

در شکل (۱-۲) هزینه نصب و راه اندازی تکنولوژی‌های مختلف تولید الکتریسیته در سال ۲۰۱۷ آمده است [۲]. منحنی پیوسته در ۰، میانگین هزینه‌های تکنولوژی‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هزینه نصب و راه اندازی تکنولوژی رانکین آلی برای تولید ۵-۱۰ کیلووات کمتر از ۳۵۰۰ یورو بر کیلووات و همچنین در بازه‌ی ۱۰-۱۰۰ کیلووات در حدود ۲۵۰۰ یورو است. بنابراین استفاده از این تکنولوژی در توانهای کوچک به صرفه می‌تواند باشد. ولیکن اگر بحث کاهش گازهای گلخانه‌ای و همچنین مالیات ورود گازهای گلخانه‌ای را در نظر بگیریم قطعاً هزینه‌های مربوط به سیکل رانکین آلی از نظر اقتصادی به صرفه خواهد بود.



شکل ۱-۲- هزینه تولید قدرت به کمک تکنولوژی های مختلف [۲]

در زیر چرخه ترمودینامیکی ایده آل T-S یک سیکل رانکین آلی با سیال عامل تولوئن نشان داده شده است. از افت فشار صرف نظر شده، همچنین خطوط هم فشار بر روی نمودار نشان داده شده است.



شکل ۱-۳- دیاگرام T-S ایده آل یک چرخه رانکین آلی با رسم خطوط هم فشار برای سیال عامل تولوئن با صرف نظر از افت فشار سیال عامل [۳]

مطابق ۰ سیال عامل با جذب گرما (نقطه ۱) در فشار ثابت  $p$ ، به دمای اشباع خود در

این فشار میرسد (نقطه ۴). در این نقطه با جذب گرمای بیشتر دما تغییر نخواهد کرد ولیکن فاز سیال از مایع به بخار تغییر میکند تا در نقطه ۵ به حالت کاملاً اشباع میرسد. در این نقطه، با جذب گرما سیال از حالت اشباع به حالت فوق اشباع (سوپرهیت) میرسد (نقطه ۶). در طی فرآیند ۶-۷ سیال عامل در تجهیز منبسط کننده (توربین) آنتالپی خود را ازدست میدهد و مقداری توان مفید تولید می‌کند. تولید توان با کاهش دما و همچنین افزایش آنتروپی همراه است. در طی فرآیند انبساط فشار سیال عامل کاهش پیدامی‌کند. گرما در طی فرآیند ۹-۱۰ از سیال عامل گرفته میشود و چرخه ترمودینامیکی دوباره تکرار میگردد.

توربین‌های گاز از اهمیت بالایی در زمینه تولید توان برخوردارند و گاز طبیعی و مواد نفتی را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. برای بهبود بازدهی سوخت، توربین‌های گاز همیشه با سیستم‌های بازیابی حرارت اتلافی از جمله سیکل‌های عادی رانکین و سیکل‌های آلی رانکین کوپل می‌شوند [۴-۵]. با در نظرگیری توسعه پایدار انرژی، سیکل‌های ترکیبی توربین گاز با بازده بالاتر ارزش بررسی دارند. سیکل برایتون فوق بحرانی<sup>۱</sup> از نظر استفاده از منابع حرارتی دما بالا مزیت دارد [۶] در حالی که سیکل بحرانی گذرا<sup>۲</sup> قادر به بازیابی منابع حرارتی درجه پایین است [۷]. از این رو بهتر است که به عنوان سیکل پایین دست برای بازیابی حرارت خروجی از توربین گاز استفاده شوند.

در این پژوهش مدلسازی عملکرد سیکل ترکیبی متشکل از توربین گاز و سیکل آبشاری رانکین آلی فوق بحرانی + گذار بحرانی تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش ما بدنال پیدا کردن شرایط طراحی بهینه برای سیکل ترکیبی (سیکل توربین گاز + سیکل فوق بحرانی رانکین آلی + سیکل گذار رانکین آلی) هستیم. لازم بذکر است منظور از سیکل فوق بحرانی یک چرخه ترمودینامیکی میباشد که در آن، شرایط ترمودینامیکی سیال عامل از نظر دما و فشار بالای نقطه بحرانی سیال عامل است همچنین یک سیکل گذرا<sup>۳</sup> یک چرخه ترمودینامیکی است که در آن سیال عامل مابین شرایط فوق بحرانی و زیر بحرانی کار میکند.

---

<sup>1</sup> Supercritical

<sup>2</sup> Transcritical

<sup>3</sup> transcritical

## ۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

در قرن اخیر، رشد اقتصادی جهان به شکل چشم گیری در حال شتاب گرفتن است. توسعه صنایع، باعث افزایش قابل توجه نیاز به انرژی شده اند. این نیاز به انرژی عمدتاً با استفاده از سوختهای فسیلی برطرف میشود که قیمت آنها روز به روز در حال افزایش است از سوی دیگر در سالهای اخیر، استفاده فزاینده از سوختهای فسیلی مشکلات زیست محیطی فراوانی مانند آلودگی شهرها، تخریب لایه ازن، بارانهای اسیدی و... را در پی داشته است. علاوه بر این با افزایش مراکز صنعتی و مصرف بیشتر این سوختها، دورنمای پایان ذخایر انرژیهای فسیلی واضح تر شده است. با توجه به موارد گفته شده، استفاده بهینه از منابع انرژی موجود و همچنین انرژی گرمای اتلافی برای تولید الکتریسیته بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

تولید الکتریسیته به وسیله انرژیهای اتلافی امروزه بسیار متداول شده به کمک بازیاب انرژی اتلافی و سیکل رانکین آلی می توان از منابع انرژی اتلافی استفاده کرد عیب اصلی استفاده از سیال عامل آب در سیکل رانکین سنتی این است که به دمای بسیار بالا (حدود ۶۰۰ درجه سلسیوس) در مرحله فوق گرمایش نیاز دارد و همچنین نیازمند بکارگیری مشعلهای کمکی و مصرف سوخت فسیلی دارد و از سوی دیگر بازده سیکل رانکین آب بخار با محرک انرژی دمایی کم است.

پتانسیل و اگزرژی انرژی اتلافی در خروجی اگزااست توربین بسیار زیاد است و در نتیجه برای دستیابی به دمای بالا برای سیکل رانکین آب بخار به مشعل های کمکی نیاز است. بکارگیری سیکل رانکین آلی یکی از نویددهنده ترین تکنولوژی های تبدیل انرژی دمایی به انرژی الکتریکی است، بنابراین توجه بسیاری از محققان به این تکنولوژی جلب شده و تحقیقات بسیاری درباره انتخاب سیال آلی و بهینه سازی پارامتری آن انجام شده است.

## ۱-۳- هدف تحقیق

هدف این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی جهت مدلسازی بازیافت حرارت از سیکل توربین گازی برایتون به کمک سیکل رانکینگ آبشاری است این مدل میتواند به مهندسین شیمی و مکانیک کمک کند تا شرایط مختلف بهره برداری را مورد ارزیابی قرار دهند افزایش



مصرف انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر موجب نگرانی سیاست‌گذاران صنعت برق و دست‌داران محیط زیست به علت افزایش هزینه و آلودگی ناشی از مصرف روزافزون سوخت فسیلی شده است. از این رو علیرغم پیشرفت کشورها در زمینه صنعت و فن‌آوری، دارای شهرهای کثیف و آب و هوای ناسالم هستند، به نحوی که آسایش ناشی از رشد اقتصادی آنها قربانی مشکلات زیست محیطی شده است. توسعه استفاده از انرژی‌های اتلافی یکی از چالش‌های اساسی انسان برای ورود به قرن بیست و یکم است.

راه حل‌های متعددی برای تولید انرژی از منابع گرمای جایگزین، مانند منابع گرمای دما پایین، پیشنهاد شده‌اند. از میان راه حل‌های پیشنهادی، سیکل رانکین آلی بیشترین کاربرد را داشته است. این سیستم از همان اجزای سیکل رایج بخار تشکیل شده است (بویلر، توربین، کندانسور و پمپ). اما سیال عامل استفاده شده، سیال آلی می‌باشد که دمای جوش پایبندی نسبت به آب دارد و تولید توان از منابع گرمایی دما پایین را امکان پذیر می‌نماید.

امروزه، سیکل رانکین آلی به صورت تجاری و در بازه توان چند مگاوات، موجود می‌باشد. اما برای مقیاس در حد چند کیلو وات مناسب نمی‌باشد. این پژوهش، وضعیت فعلی این تکنولوژی را بررسی کرده و کاربردهای اصلی آن را بیان می‌کند. همچنین مدل سازی ریاضی این سیکل بصورت هیبرید با توربین گاز را به اختصار مورد بررسی قرار می‌دهد و مسایلی مانند انتخاب سیال عامل، بهینه سازی انرژی و انرژی را نیز مورد بررسی قرار خواهد داد

## ۱-۴- بیان مساله

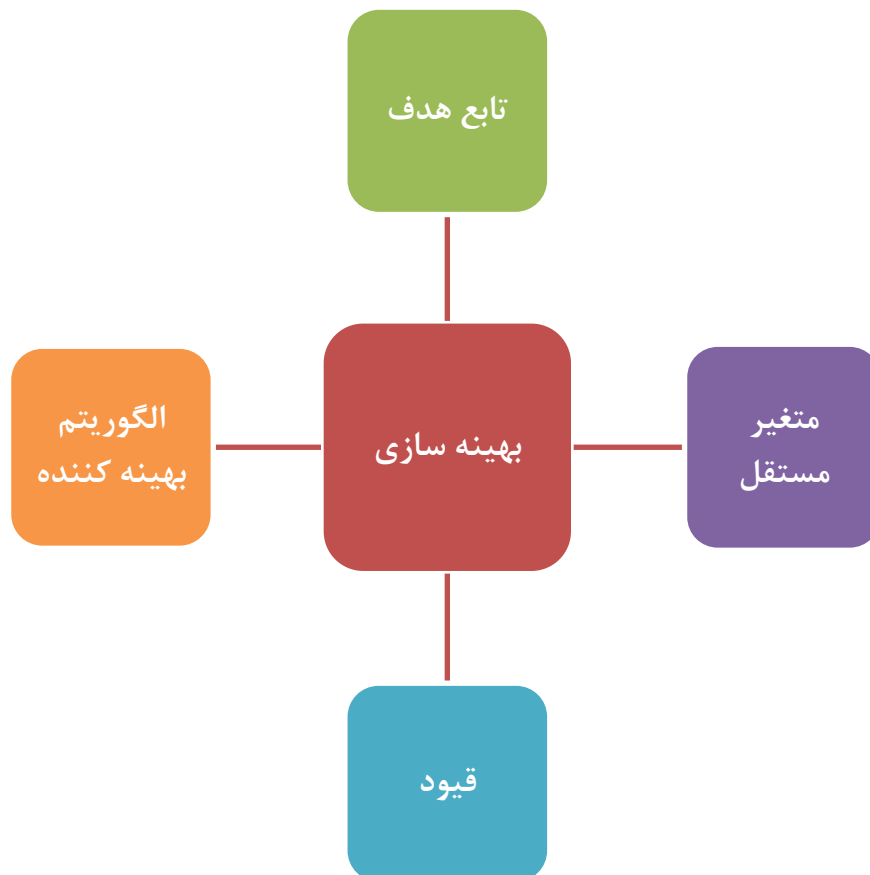
در این پژوهش مدلسازی عملکرد سیکل ترکیبی متشکل از توربین گاز و سیکل آبشاری رانکین آلی فوق بحرانی + گذار بحرانی تحت شرایط طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش ما بدنبال پیدا کردن شرایط طراحی بهینه برای سیکل ترکیبی (سیکل توربین گاز + سیکل فوق بحرانی رانکین آلی + سیکل گذار رانکین آلی) هستیم

در این پژوهش اثر هر متغیر مستقل بر روی عملکرد و راندمان کلی و توان خروجی کل سیکل ترکیبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. متغیرهای طراحی شامل فشار و دمای و دبی ورودی به کمپرسور سیکل فوق بحرانی است. متغیرهای وابسته شامل راندمان کلی سیکل، توان کلی سیکل، نسبت توان تولیدی دو سیکل آبشاری رانکین آلی می‌باشد بمنظور پیدا کردن شرایط بهینه از نظر راندمان و تولید توان، از الگوریتم ژنتیک استفاده خواهیم کرد. الگوریتم ژنتیک

سرآمد الگوریتم های بهینه سازی تصادفی است. این الگوریتم به کمک اپراتورهای قدرتمند خود قادر است هر مساله بهینه سازی پیچیده را در کوتاهترین زمان حل کند.

### ۱-۴-۱- بهینه سازی

هر مساله بهینه سازی در مهندسی از ۴ بخش اصلی تشکیل شده است. ۱- تابع هدف- ۲- متغیرهای مستقل ۳- قیود مساله ۴- الگوریتم بهینه کننده. در پژوهش حاضر در ادامه هر کدام از این ۴ بخش به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.

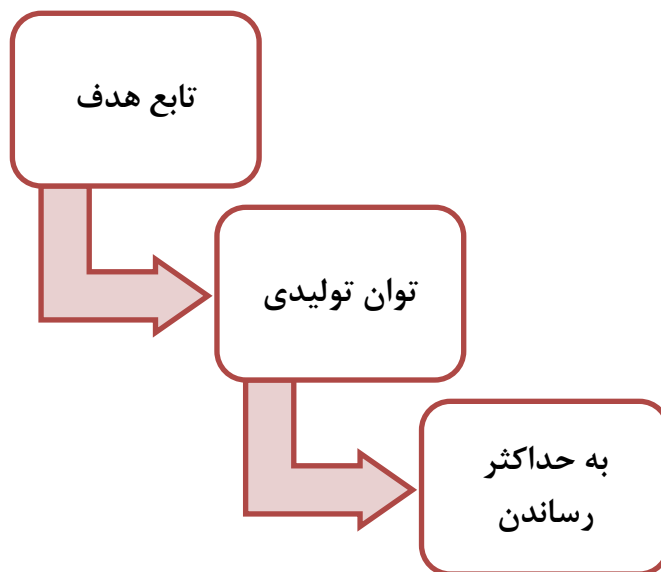


شکل ۱-۴- بخش های اصلی هر نوع مساله بهینه سازی در علوم مهندسی

### ۱-۴-۱-۱- تابع هدف

پایه و اساس هر مساله بهینه سازی، تابع هدف مساله است. در واقع تابع هدف، متغیری است که قرار است بهینه گردد. منظور از بهینه کردن به حداکثر و یا به حداقل رساندن تابع

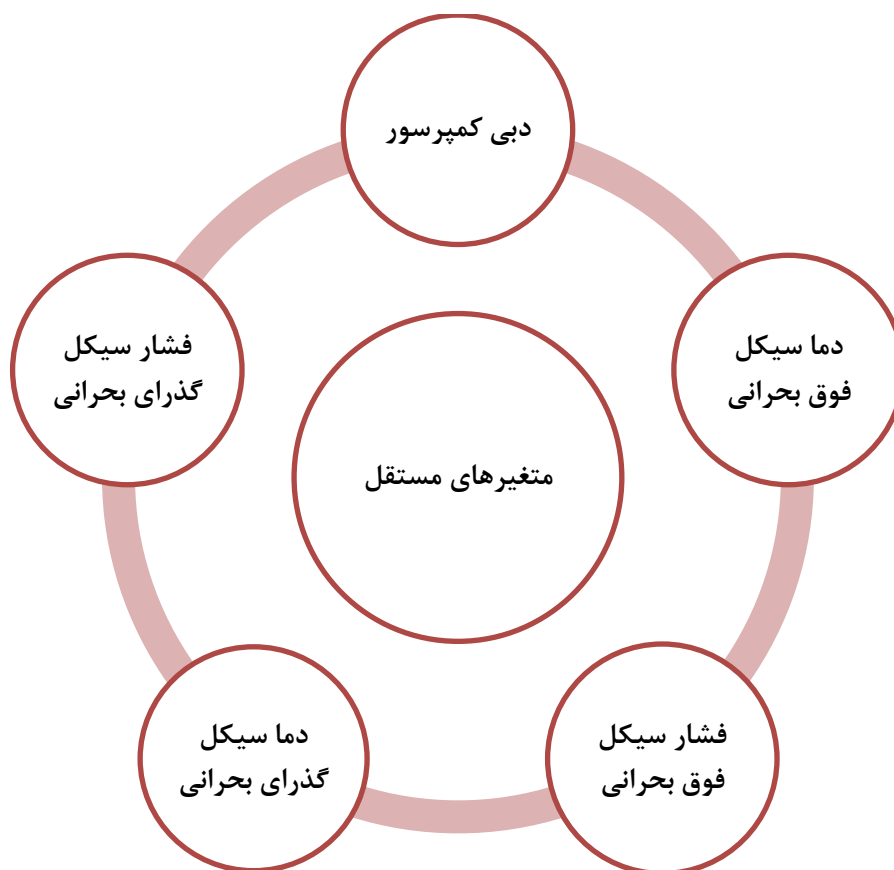
هدف است. در این پژوهش تابع هدف توان کل تولیدی از سیکل فوق بحرانی و بحرانی گذرا است



شکل ۱-۵- تابع هدف مورد بررسی در این پژوهش

#### ۱-۴-۱-۲- متغیرهای مستقل

متغیرهای مستقل در هر مسأله بهینه‌سازی از ابتدا باید مشخص گردد هدف از بهینه‌سازی پیدا کردن بهترین مقادیر این متغیرهاست در این مطالعه پنج متغیر مستقل انتخاب گردید. این متغیرها بر روی تابع هدف مسأله تاثیر گذارند و با تغییر هر کدام از آنها مقدار تابع هدف تغییر میکند متغیرهای مستقل انتخاب شده دبی کمپرسور دما و فشار سیکل فوق بحرانی و دما و فشار سیکل انتقالی هستند



شکل ۱-۶- متغیرهای مستقل مساله بهینه سازی

## ۱-۵- فرضیات پژوهش

در ادامه سوالات اصلی تحقیق به اختصار آمده است

- ۱- ترکیب یک جفت سیکل رانکین آلی بصورت آبشاری با سیکل توربین گاز تا چه اندازه راندمان کلی و توان خروجی کلی را افزایش می‌دهد؟
- ۲- آیا الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک قادر است شرایط بهینه‌ی سیکل آبشاری را جهت دستیابی به حداکثر توان و راندمان پیش‌بینی کند؟
- ۳- نسبت توان برای سیکل آبشاری رانکین آلی به چه صورت است؟ (توان تولیدی سیکل فوق بحرانی به سیکل گذرا)

ترکیب یک جفت سیکل رانکین آلی بصورت آبشاری با سیکل توربین گاز راندمان کلی و توان خروجی را نسبت به سیکل رانکین معمولی افزایش می‌دهد الگوریتم ژنتیک قادر است شرایط بهینه‌ی سیکل آبشاری را جهت دستیابی به حداکثر توان و راندمان پیش‌بینی کند.

بعد از مدلسازی میتوان نسبت توان برای سیکل آبخاری رانکین را محاسبه نمود

## ۱-۶- مزایا و معایب سیکل رانکین آلی

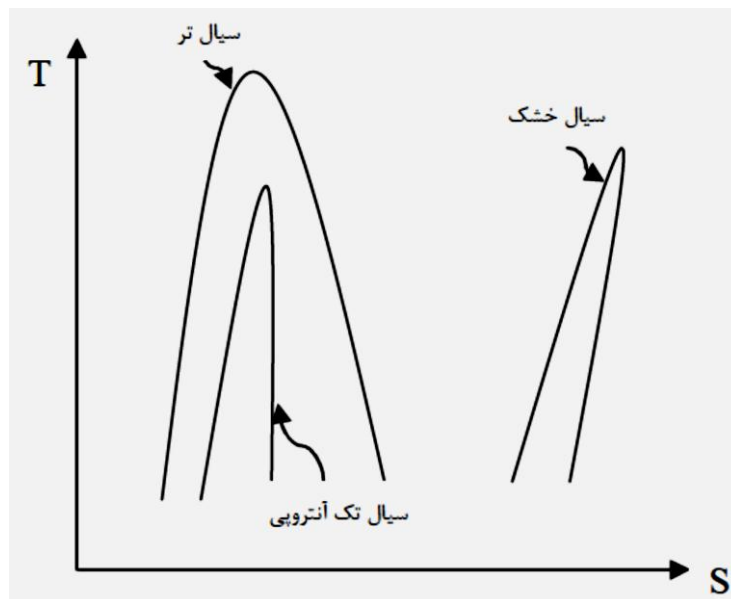
یکی از مزایای اصلی سیکل رانکین آلی، استفاده از انرژی دمپایین اتلافی است اکثر معایب ذکر شده برای سیکل بخار رانکین سنتی با بکارگیری این سیکل برطرف می‌گردد. سیکل رانکین آلی یکی از نویددهنده ترین تکنولوژی های تبدیل این انرژی دمپایین به انرژی الکتریکی است، بنابراین توجه بسیاری از محققان به این تکنولوژی جلب شده و تحقیقات جدیدی درباره انتخاب سیال آلی و بهینه‌سازی پارامتری آن انجام شده است.

سیکل رانکین آلی سیکل رانکینی است که در آن، از سیال آلی یا سیالات غیرمتداول به جای ترکیب آب بخار استفاده می‌شود. همانطور که گفته شد، این سیکل چندین مزیت نسبت به سیکل بخار متداول دارد که از جمله آن می‌توان به استفاده کارآمد از منابع انرژی دمپایین، ساده و کوچک تر بودن سیستم و عملکرد اقتصادی بهتر اشاره کرد. همچنین مشکل اصلی استفاده از سیکل رانکین آلی، بازده انرژی کم، محدودیت راه های موجود برای افزایش کار خروجی، انتخاب سیال آلی مناسب، انتخاب پارامترهای طراحی به طوری که باعث ماکزیمم شدن توابع هدف مورد نظر شود و هماهنگی دمای اجزای سیکل با دمای منبع و چاه گرمایی است [۸]، سیکل رانکین آلی یک تکنولوژی پذیرفته شده در دنیاست که با استفاده از منبع انرژی دمپایین بازده نسبتاً خوبی نسبت به سایر سیکل های تولید قدرت دارد. این سیکل همچنین دارای محدودیتهای ترمودینامیکی است. بدین صورت که مقدار گرمای دریافتی از منابع دمپایین محدود است. این محدودیت در واقع تابعی از دمای منبع و چاه گرمایی است. آنالیز ترمودینامیکی سیکل های تولید قدرت دو مورد را برای عملکرد بهتر سیستم یادآوری می کند که اولی بهبود گرما و اگزرژی ورودی به سیستم و دیگری افزایش قابلیت تبدیل گرمای ورودی به کار خروجی در سیستم است [۹].

## ۱-۷- ملاحظات درباره سیال آلی انتخابی

براساس شیب بخار اشباع در نمودار T-S (شیب منحنی T-S در نقطه  $x=1$  نقطه بخار اشباع) سیالات آلی که دارای شیب مثبت، منفی و بدون شیب هستند، به ترتیب سیالات آلی

خشک، تر و تک آنتروپی نام گذاری می شوند. در شکل زیر، نمودار T-S انواع سیالات آلی را مشاهده می کنید.



شکل ۱-۷- نمودار T-S انواع سیالات آلی

نوع شیب سیال در نمودار T-S یک پارامتر اساسی در کاربرد سیال، بازده سیستم، کار خروجی و نوع پیکره‌بندی اجزای مختلف در سیکل است؛ برای مثال، در صورتی که شیب خط مماس بر منحنی T-S در نقطه  $X=1$  (بخار اشباع) منفی باشد سیال عامل تر نامیده میشود در صورت استفاده از سیال خشک (مانند R245fa) (پنتافلوروپروپان)، جریان خروجی از توربین همواره در ناحیه فوق گرم بوده است. این امر استفاده از مبدل حرارتی بازیاب را برای استفاده از انرژی گرمایی این جریان فوق گرم امکانپذیر می‌سازد. در سیال عامل تک آنتروپی شیب خط مماس بر منحنی در نقطه  $X=1$  بی نهایت است. همچنین تأثیر این سیالات آلی بر روی محیط با مفاهیمی مانند  $ODP^1$  و  $GWP^2$  بررسی می شوند. ODP در واقع توانایی یک مولکول از سیال آلی مورد نظر برای تخریب لایه اُزن است و مقدار کمتر این پارامتر به معنی کم خطر بودن آن برای لایه اُزن و محیط اطراف است.

$GWP$  نیز یک مقدار اندازه گیری شده است (معمولاً در یک دوره صدساله) که میزان اثر تخریبی سیال آلی بر روی محیط را در مقایسه با دی اکسیدکربن بیان می کند. در این باره نیز مقدار خطر کمتری برای محیط زیست وجود دارد [۸]. همچنین استفاده از یک سیال آلی با

<sup>1</sup> Ozone Depletion Potential

<sup>2</sup> Global Warming Potential

چگالی بخار بالا نیز مناسب به نظر می‌رسد، به دلیل اینکه استفاده از این سیال، امکان کاهش ساینز توربین و مساحت مبدل حرارتی را امکان پذیر می‌سازد. علاوه بر موارد گفته شده فوق، مواردی مانند قابلیت اشتعال پذیری، میزان سمی بودن، قیمت سیال آلی و پایداری شیمیایی سیال نیز می‌تواند شود. برای انتخاب سیال آلی در تحقیقات پیشین، موارد مختلفی ذکر شده؛ از جمله در سیکل رانکین آلی خورشیدی با محرک آب گرم ۹۰ درجه سلسیوس معیار انتخاب سیال آلی این است که دمای بحرانی بالای ۷۵ درجه سلسیوس باشد [۱۰] در تحقیق دیگری که محرک سیکل گرمای اتلافی ۱۸۰ درجه سلسیوس است، معیار انتخاب سیال آلی کمتر بودن دمای بحرانی از ۲۰۰ درجه سلسیوس و ODP کمتر از ۱ عنوان شده است [۱۱].

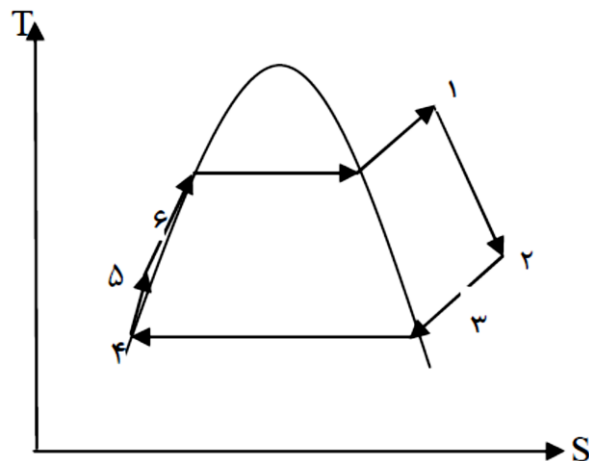
جدول ۱-۱- خواص سیالات آلی انتخابی با منابع گرمایی دما پایین [۱۱]

سیال	نام علمی سیال عامل	جرم مولکولی ( $\text{gr.mol}^{-1}$ )	دمای جوش نرمال ( $^{\circ}\text{C}$ )	دمای بحرانی ( $^{\circ}\text{C}$ )	فشار بحرانی (Mpa)	ODP	GWP
<b>R290</b>	high purity propane	۴۴/۱	-۴۲/۱	۹۶/۶	۴/۲۴۷	۰	۲۰
<b>R717</b>	ammonia	۱۷/۰۳	-۳۳/۳	۱۳۲/۳	۱۱/۳۳	۰	۱
<b>R12</b>	Dichlorodifluoromethane	۱۲۰/۹۱	-۲۹/۸	۱۱۲	۴/۱۱۴	۱	۱۰/۸۹
<b>R143a</b>	1,1,1,2-tetrafluoroethane	۸۴/۰۴	-۴۷/۲	۷۲/۱	۳/۷۶	۰	-
<b>R32</b>	Difluoromethane	۵۲/۰۲	-۵۱/۷	۷۸/۱۱	۵/۷۸	۰	۶۷۵
<b>R113</b>	Trichloro-trifluoroethane	۱۸۳/۳	۴۷/۶	۲۱۴/۱	۳/۴۳۹	۱	۶۱۳۰
<b>R141b</b>	Dichloro-1-fluoroethane	۱۱۶/۹	۳۲	۲۰۴/۲	۴/۲۴۹	۰/۱۲	۷۲۵

## ۸-۱- سیکل رانکین آلی بازیاب

سیکل رانکین آلی بازیاب مشابه سیکل رانکین متداول است و از اجزای توربین، کندانسور، پمپ، بویلر و مبدل بازیاب تشکیل شده است. همچنین نمودار دما-آنترپی سیکل رانکین آلی بازیاب در ۰ قابل مشاهده است. مایع سیال آلی در نقطه ۵ پمپ شده و فشار و دمای آن افزایش پیدا کرده و سپس وارد پیش گرمایش بویلر می‌شود. در مرحله پیش گرمایش مقداری از گرمای قابل استفاده جریان خروجی از توربین به مایع خروجی از پمپ قبل از ورود به بویلر داده می‌شود. دلیل استفاده از پیش گرمایش این است که سیال خروجی از

توربین به صورت بخار فوق گرم بوده و بسته به نوع سیال مورد استفاده و نسبت فشار سیکل دارای دمای بسیار بیشتر نسبت به سیال خروجی از پمپ بوده که میتوان از این اختلاف دما برای پیش گرمایش سیال ورودی به بویلر استفاده کرد.



شکل ۱-۸- نمودار T-S سیکل رانکین آلی بازیاب

در بویلر سیال آلی با دریافت گرما از منبع گرمایی به بخار فوق گرم تبدیل شده و با فشار و دمای بالا وارد توربین می شود که تولید کار و جریان الکتریسیته می کند. جریان خروجی از توربین همانطور که گفته شد، ابتدا در مبدل بازیاب مقداری حرارت به مایع خروجی از پمپ می دهد و سپس در کند انسور با دفع حرارت به مایع اشباع تبدیل می شود. تحلیل سیکل رانکین آلی از منظر انرژی و اگزرژی، با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای اجزای مختلف سیکل و با استفاده از سیالات آلی مختلف انجام می شود. بازگشت ناپذیری ها در اجزای مختلف یک سیکل ترمودینامیکی باعث نزول عملکرد سیستم می شوند. در یک فرایند واقعی، بعضی فاکتورهای خارجی یا داخلی باعث تولید آنتروپی می شوند. تولید آنتروپی داخلی در سیکل رانکین آلی عمدتاً از عواملی مانند افت فشار در لوله ها، انبساط ناخواسته در توربین و انتقال حرارت داخلی در اثر اختلاف دمای مشخص در اجزای سیستم رخ میدهد. همچنین تولید آنتروپی خارجی در اثر انتقال حرارت یا کار سیستم با خارج از مرزهای حجم کنترل سیستم رخ میدهد. با ثابت بودن شرایط جریان و همچنین فرض هریک از اجزای سیکل رانکین آلی به عنوان حجم کنترل، توازن انرژی و برگشت ناپذیری در هریک از اجزا به ترتیب به صورت روابط (۱-۱) و (۲-۱) نوشته می شوند:



$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_{in} h_{in} - \sum_{i=1}^n \dot{m}_{out} h_{out} = 0 \quad (1-1)$$

$$\dot{I} = \dot{m} T_0 \frac{ds_{total}}{dt} \quad (2-1)$$

در روابط فوق  $\dot{Q}$  و  $\dot{W}$  به ترتیب نرخ حرارت و کار مبادله شده،  $\dot{m}$  دبی جرمی و  $h$  و  $S$  به ترتیب آنتالپی و آنتروپی مخصوص می باشند. معادله (۳-۱) میزان بازگشت ناپذیری را نشان می دهد

$$\dot{I} = \dot{m} T_0 \left( \sum_{i=1}^n s_{out} - \sum_{i=1}^n s_{in} + \frac{ds_{system}}{dt} + \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{T_k} \right) \quad (3-1)$$

در معادله فوق  $T_k$  دمای منبع گرمایی،  $q_k$  مقدار انتقال حرارت بین منبع گرما و سیال عامل و  $T_0$  دمای محیط است. در حالتی که سیستم به حالت پایا می رسد،  $\frac{ds_{system}}{dt} = 0$  می شود.

برگشت ناپذیری های داخلی در اجزای سیستم با استفاده از ترم  $\sum S$  و برگشت ناپذیری های خارجی با استفاده از ترم  $\sum \frac{q}{T}$  محاسبه می شوند. لازم بذکر است در اکثر تحقیقات، برای سادگی از برگشت ناپذیری های داخلی متناظر با افت فشار در اجزای سیستم مانند مبدل های حرارتی و لوله ها صرف نظر می کنند. معادلات فوق برای هریک از اجزای سیکل رانکین آلی بازایاب به صورت زیر نوشته می شوند [۸]:

### ۱-۸-۱- توربین، فرآیند (۲-۱)

در فرآیند (۲-۱) بخار فوق گرم ورودی باعث چرخش پره های توربین و ایجاد کار و به تبع آن تولید جریان الکتریسته می شود. در حالت ایده آل توربین یک فرایند آیزونتروپیک را طی می کند، اما این فرایند ایده آل هیچ گاه اتفاق نمی افتد و حالت سیال خروجی توربین متناظر با نقطه ۲ در ۰ مشخص است. با فرض بازده آیزونتروپیک توربین برابر با ۸۰ درصد، برگشت ناپذیری و کار خروجی توربین از روابط زیر به دست می آیند:

$$\eta_{iso,tur} = \frac{\dot{W}_{act,tur}}{\dot{W}_{iso,tur}} \quad (4-1)$$

$$\dot{W}_{act,tur} = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_2) \quad (5-1)$$

$$\dot{I}_{tur} = \dot{m}_{wf}T_0(s_2 - s_1) \quad (6-1)$$

### ۱-۸-۲- مبدل حرارتی بازیاب، فرآیند (۲-۳ و ۵-۶)

در فرآیند (۲-۳ و ۵-۶) گرمای محسوس از سیال فوق گرم خروجی توربین به مایع خروجی از پمپ قبل از ورود به بویلر منتقل می‌شود، برای مبدل حرارتی بازیاب روابط زیر برقرارند

$$h_2 - h_3 = h_6 - h_5 \quad (7-1)$$

$$s_2 - s_3 = s_6 - s_5 \quad (8-1)$$

### ۱-۸-۳- کند انسور (۳-۴)

فرآیند (۳-۴) یک فرایند چگالش فشار ثابت است که سیال عامل به وسیله آب خنک معمولاً ورودی از برج خنک کن به محیط گرما دفع می‌کند و به مایع اشباع تبدیل می‌شود. تبادل حرارت و برگشت ناپذیری در کندانسور از روابط زیر بدست می‌آید. لازم بذکر است به دلیل اینکه گرما به وسیله برج خنک کن به محیط دفع می‌گردد،  $T_L = T_0$  در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_4) \quad (9-1)$$

$$\dot{I}_{con} = \dot{m}_{wf}T_0(s_4 - s_3 + \frac{h_3 - h_4}{T_L}) \quad (10-1)$$

### ۱-۸-۴-پمپ، فرآیند (۵-۴)

پمپ فشار و دمای مایع خروجی از کند انسور را افزایش می‌دهد. در این مورد نیز حالت ایده‌ال در یک مسیر تک آنترپپی اتفاق می‌افتد، ولی در عمل هیچ گاه این حالت ایده‌ال دست یافتنی نیست. با فرض بازده آیزونتروپیک پمپ برابر ۸۵ درصد بازده آیزونتروپیک، برگشت ناپذیری و کار پمپ از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{W}_{iso,pump}}{\dot{W}_{act,pump}} \quad (11-1)$$

$$\dot{W}_{act,pump} = \dot{m}_{wf}(h_5 - h_4) \quad (12-1)$$

$$\dot{I}_{pump} = \dot{m}_{wf}T_0(s_5 - s_4) \quad (13-1)$$

### ۱-۸-۵-بویلر فرآیند (۱-۶)

سیال فشار بالای خروجی از پمپ پس از پیش گرمایش در مبدل حرارتی، وارد بویلر و به سیال فوق گرم برای ورود به توربین تبدیل می‌شود. تبادل حرارت و برگشت‌ناپذیری در بویلر از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\dot{Q}_{boi} = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_6) \quad (14-1)$$

$$\dot{I}_{boi} = \dot{m}_{wf}T_0(s_1 - s_6 + \frac{h_6 - h_1}{T_H}) \quad (15-1)$$

رابطه فوق،  $T_H$  دمای منبع گرمایی است که در این مورد دمای آب گرم خروجی از کلکتور است.

برای سیکل رانکین آلی بازده قانون اول و بازده قانون دوم از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\eta_{en,orc} = \frac{\dot{W}_{act,tur} - \dot{W}_{act,pump}}{\dot{Q}_{boi}} \quad (16-1)$$

$$\eta_{ex,orc} = \frac{\dot{W}_{act,tur}}{\dot{W}_{act,pump} + \dot{I}_{tot}} \quad (17-1)$$

$\dot{Q}_{boi} = \dot{Q}_{sc}$  است. همچنین برگشت ناپذیری کلی سیکل رانکین آلی بوده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{I}_{tot} = \dot{I}_{tur} + \dot{I}_{con} + \dot{I}_{pump} + \dot{I}_{boi} \quad (۱۸-۱)$$

## **فصل دوم**

### **مطالعات گذشته**

## ۲-۱- مقدمه

اصول اساسی سیکل رنکین آلی<sup>۱</sup> مشابه اصول قراردادی سیکل توان رنکین است. با این تفاوت مهم که سیال عامل در اینگونه سیکل یک سیال آلی است که نقطه جوش پایین تر و فشار بخار بالاتری نسبت به آب دارد. این مسأله عملکرد کلی یا کارایی سیکل های رنکین آلی را به صورت عمده در مقایسه با سیکل رنکین رایج بهبود می بخشد. یک سیکل رنکین به عنوان وسیله ای برای تولید انرژی مؤثر جهت تبدیل سیال عامل دما پایین به بخار دما بالا و فشار بالا مورد استفاده قرار می گیرد. سیکل های رنکین آلی از سیالات آلی که فشار بخار اشباع بالاتر و نقطه جوش پایین تری نسبت به آب دارند، جهت بهبود اتلاف حرارتی دما پایین به عنوان انرژی استفاده می کنند.

سیکل های رنکین آلی مشابه سیکل های بزرگ رنکین بخار در نیروگاه های زغال سوز الکتریکی هستند. حرارت به یک مبدل حرارتی انتقال داده می شود که در آن مایع متراکم شده، به بخار فوق گرم در فشار ثابت تبدیل می شود. بخار در مسیر توربین منبسط می شود تا کار خروجی تولید شود خروجی بخار از توربین به چگالنده<sup>۲</sup> وارد و حرارت دفع می شود، تا اینکه بخار به حالت مایع تبدیل شود. مایع اشباع به پمپ فرستاده می شود که در آن فشار مایع افزایش یافته و مجدداً به مبدل حرارتی برگردانده و سیکل دوباره تکرار می شود. اختلاف اساسی بین سیکل های رنکین بخار بزرگ و سیکل های رنکین آلی استفاده سیکل های رنکین آلی از سیالات عامل سنگین، یعنی، ترکیبات آلی است که منتج به کارایی بهتر نسبت به موتورهای سیکل رنکین بخار برای منابع حرارتی با دمای زیر ۳۷۰ درجه سانتی گراد می گردد، نمونه های سیکل آلی فقط به یک منبسط کننده تک مرحله ای در توربین نیاز دارند که آنها را از منبسط کننده های چند مرحله ای در موتورهای رنکین بخار ساده تر می سازد. با افزایش سریع هزینه های منابع انرژی تمام شدنی، یافتن راه های مؤثر در استفاده از اتلافات حرارتی ضروری است. استفاده از تکنولوژی انرژی های تجدیدپذیر به دو دلیل مطرح شده است: ۱- استفاده بی رویه از سوخت های فسیلی ۲- وضع مقررات زیست محیطی.

<sup>1</sup> Organic Rankine Cycle (ORC)

<sup>2</sup> Condenser

هزینه پایین سوخت‌های فسیلی منجر به اتمام اجتناب‌پذیر منابع این سوخت‌ها می‌شود. علاوه بر آن امروزه هشدار جهانی در ارتباط با آلودگی هم شروع به ایجاد فشار کرده‌اند تا هم به صورت بین‌المللی و هم به صورت محلی، مقررات انتشار محیطی موجود را افزایش دهند.

یکی از مزیت‌های اصلی سیکل‌های آلی سادگی مکانیکی آنها است. قابل ذکر است که سیکل‌های آلی به طور نمونه شامل یک جزء دوار (توربین) برای کل سیستم هستند. در چند دهه گذشته هزاران سیکل رنکین آلی در محدوده‌ی توان خروجی از ۱ تا ۱۰۰۰ KW مورد بهره‌برداری قرار گرفتند.

اخیراً، بازار برای سیستم‌های نیرو سیکل رنکین آلی در محدوده صدها میلیون دلار است. در مدت کوتاه افزایش مقررات محیطی احتمالاً اولین چاره‌ای خواهد بود که جریان بازار را به سطحی بالاتر، قبل از افزایش روند قیمت‌های سوخت خواهد رساند. بنابراین در جاهایی که سیکل‌های آلی بازار بیشتری داشته باشند، از حرارت تلف شده بهره خواهند گرفت. در جلسات زیست محیطی بین‌المللی در کیوتو ژاپن، در دسامبر ۱۹۹۷ و در بوینس آیرس آرژانتین در نوامبر ۱۹۹۸ در پروتکلی موسوم به کیوتو به نتایجی رسیدند که از جمله آنها محدود کردن استفاده از گازهای گلخانه‌ای بود، همچنین ایالات متحده تعهد کرد که توزیع گازهای گلخانه‌ای را ظرف ۱۵ سال آینده تا ۴۰ درصد کاهش دهد. جوامع توسعه یافته به مقدار زیادی از انرژی الکتریکی برای تولید کالاها نیاز دارند تا از روند زندگی‌شان لذت ببرند. جوامع در حال توسعه نیز شروع به استفاده از ملزومات مشابه نیروهای الکتریکی کرده‌اند. بر اساس قرارداد کیوتو، افزایش تقاضا نمی‌تواند موجب افزایش انرژی از سوخت فسیلی شود و لذا تنها راه حل - ها، انرژی هسته‌ای، منابع تجدیدپذیر و بهره‌گیری بهتر از سوخت فسیلی است که باید در نظر گرفته شوند. بررسی این منابع با انتخاب کاربرد بهتری از سوخت‌های فسیلی به طور قطع مهمترین مسائل در این مدت کوتاه هستند و این مستلزم آن خواهد بود که همه منابع ائتلاف حرارتی در بیشینه مقدارشان به کار برده شوند. تکنولوژی سیکل رنکین آلی یک راه امکان‌پذیر برای تبدیل جریان‌های حرارتی تلف شده به جریان الکتریسته است و می‌تواند بهترین سیستم انتقال توان برای تعداد زیادی از فرآیندها باشد. به خاطر ارزشمند شدن، فناوری‌های جدید انرژی پدیدار شده‌اند تا از منابعی که تاکنون نامناسب بوده‌اند، برای تولید انرژی الکتریکی بهره‌برداری کنند. حرارت ائتلافی از فرآیندهای صنعتی، انرژی خورشیدی نگهداری شده در کلکتورها، جریان‌های خنک کننده آب در موتورهای دیزلی ثابت و تخلیه موتورهای دیزلی و انرژی زیست توده<sup>۱</sup> نمونه‌هایی از این نوع منابع هستند. از نکات مهم در استفاده از آنها، کارایی بالا در تبدیل به جریان الکتریسته و هزینه پایین نصب تجهیزات آنها است. ارزیابی و بهینه‌سازی کاربرد سیکل رنکین آلی برای تبدیل انرژی حاصل از منابع حرارتی دما پایین به توان با استفاده از سیالات آلی و انتخاب نوع سیال عامل، قسمت مهمی از پایان‌نامه می‌باشد. تغییرات پارامترهای اساسی مانند دما و فشار

<sup>۱</sup> Biomass

و چگونگی تأثیر آنها بر پارامترهای مختلف نظیر بازده حرارتی سیکل، بازگشت ناپذیری سیکل، بازده قانون دوم و دبی جرمی مورد نیاز برای تولید توان نیز مورد نظر می‌باشد. در اینجا به کارهای صورت گرفته در این زمینه پرداخته خواهد شد.

تهیه انرژی الکتریکی پایدار، مسئله مهمی برای صنعت و دولت‌ها به ویژه در کشورهای صنعتی می‌باشد که این مشکل با افزایش مصرف سوخت فسیلی، نگرانی زیست محیطی نیز به همراه دارد؛ تولید انرژی از منابع انرژی دما پایین گزینه مناسبی برای رفع این مشکل می‌باشد. یک فن‌آوری برای استفاده از انرژی نو و تولید توان از منابع دما پایین، سیکل رنکین آلی است که با بکارگیری سیال عامل آلی برای تولید توان از منابعی نظیر زمین گرمایی و انرژی خورشیدی و انرژی اتلافی استفاده می‌کند.

کارکرد سیکل رنکین آلی همانند سیکل رنکین متداول می‌باشد با این تفاوت که سیال عامل آلی که دارای نقطه جوش پایین‌تر و فشار بخار بالاتری است جایگزین آب می‌شود. این امر موجب بکارگیری وسایل و تجهیزات کوچکتر و عدم نیاز به میزان انرژی بالا برای تولید بخار و به دنبال آن هزینه کمتر می‌شود. البته منابع دیگری چون گرما اتلافی در واحدهای صنعتی و انرژی زیست توده نیز در دسترس می‌باشد که در اینجا چندان مورد تأکید قرار نمی‌گیرد. برای دسترسی به بازده حرارتی بهتر انتخاب سیال عامل بسیار مهم می‌باشد. وی مایزا و امایزا<sup>۱</sup> [۱۲] تحقیقاتی در زمینه عملکرد و مشخصات تعدادی از سیالات به کار رفته در سیستم بازیابی گرمای اتلافی<sup>۲</sup> انجام داده‌اند تحقیقات آنها نشان داد R-123 و R-124a عملکرد مناسبی در تولید پیوسته توان داشته و R-125 و R-134a ضریب تراکم پذیری مناسبی داشته و به عنوان مناسب ترین سیال عامل جهت مقاصد تولید غیر پایا انتخاب گردید. صالح و همکارانش<sup>۳</sup> [۱۳] از آلکان‌ها، اترها، فلوئورآلکان‌ها و فلوئوراترها به عنوان سیال عامل در نیروگاه‌های زمین گرمایی در فشار بالای ۲۰ بار استفاده کردند و دریافتند بالاترین بازده حرارتی حدود ۱۳٪ برای ان-بوتان<sup>۴</sup> با دمای جوش بالا بوده است. آنها نتایج بدست آمده را مطابق ۰ ارائه کردند در شکل زیر بازده حرارتی برای سیال عامل های مختلف برای نسبت فلوهای حجمی گوناگون آورده شده است.

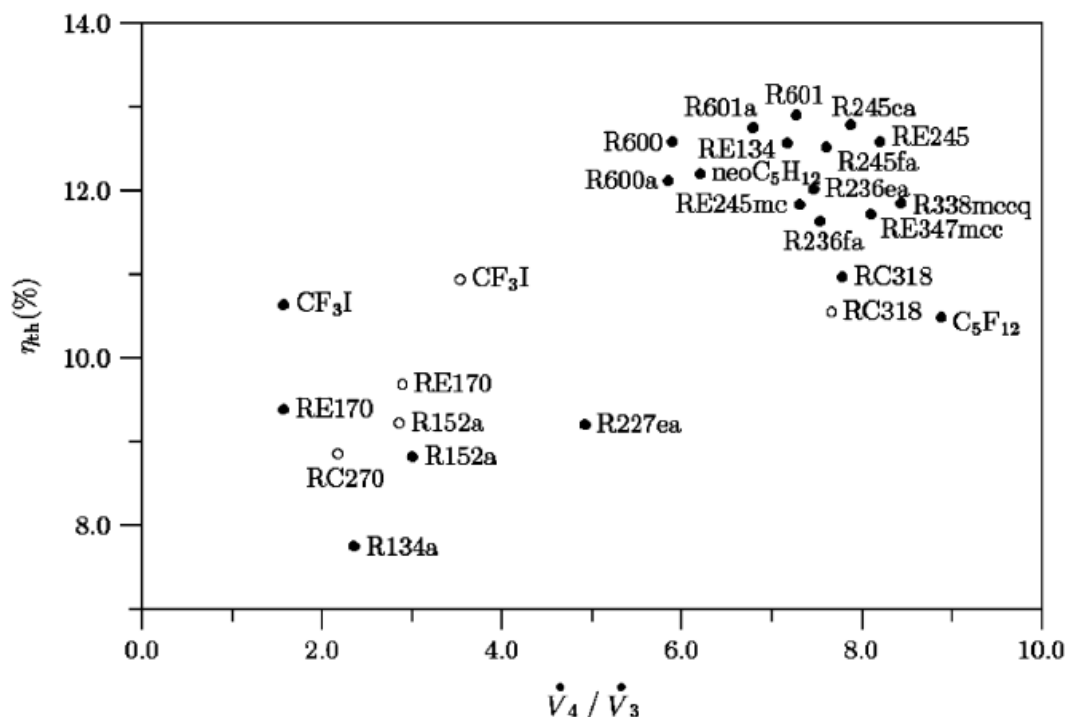
<sup>1</sup> V.Maiza and A. Maiza

<sup>2</sup> Waste heat recovery

<sup>3</sup> Saleh et al.

<sup>4</sup> N-butane





شکل ۲-۱- راندمان حرارتی بر حسب نسبت فلوی حجمی خروجی به ورودی توربین

هیونگ و همکاران<sup>۱</sup> [۱۴] در تحقیقی سیالات را به سه دسته خشک، تر و آیزنتروپیک تقسیم و مورد مطالعه قرار دادند و با این فرض که شرایط سیالات در ورودی توربین به صورت بخار اشباع باشد با بررسی پارامترهای مختلف نظیر دما و فشار ورودی توربین، بازده سیستم و بازگشت ناپذیری کل به این نتیجه رسیدند که سیالات آیزنتروپیک گزینه بهتری برای استفاده می‌باشند چرا که نه مشکل رطوبت سیالات تر در خروجی توربین علیرغم بازده حرارتی بهتر دارند و نه مشکل ما فوق گرم بودن سیالات خشک که منجر به استفاده از بازیاب برای کاهش بار حرارتی کندانسور می‌شود.

همچنین در تحقیق دیگری [۱۵] از بعضی ترکیبات سرمازا<sup>۲</sup> به عنوان سیال عامل در سیکلی بین دو منحنی هم فشار را مورد مطالعه قرار دادند و متوجه شدند که بازده سیستم برای سیالات تر و خشک به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. لیو و همکارانش<sup>۳</sup> [۱۶] تأثیر چندین سیال عامل روی یک سیکل رنکین آلی برای بازیابی گرمای اتلافی را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این بررسی دریافتند وجود پیوند هیدروژنی در برخی سیالات نظیر آب، آمونیاک و اتانول سبب رفتاری مشابه سیالات تر و در نتیجه آنتالپی تبخیر بالایی شده که این سیالات را نامناسب برای سیکل رنکین آلی می‌کند.

اسرینیواسان<sup>۴</sup> و ماگو<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۰ به بررسی ترکیب یک موتور احتراق داخلی و سیکل رانکین

<sup>۱</sup> Hung et al.

<sup>۲</sup> Cryogens

<sup>۳</sup> Liu et al.

<sup>۴</sup> Kalyan K. Srinivasan

<sup>۵</sup> Pedro J. Mago

آلی جهت کاهش آلاینده‌گی‌ها و افزایش بازده سیکل پرداختند. در مطالعه انجام شده شاخصه‌های ترمودینامیکی و اگزرتیکی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت به افزایش درصدی بازدهی راندمان سیکل و کاهش ۳۸ درصدی آلاینده‌ها در سیکل ترکیبی دست یافتند.[۱۷]

نیشیت<sup>۱</sup> و سانتانو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹ به بررسی استفاده از سیکل‌های رانکین آلی در دماهای پایین پرداختند. آنها ۱۶ ماده آلی در سیکل مدل شده را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند سیالات خشک قابلیت بهتری برای استفاده در دماهای پایین دارند و بازدهی بیشتری در سیکل ایجاد خواهند کرد. همچنین در تحقیقاتی که انجام دادند، مزایای استفاده از سیکل رانکین آلی را برای استفاده از بخش دمای پایین پینچ فرایندها بر شمرند.[۱۸]

موهانتی<sup>۳</sup> و پالوسو<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۱ معیار طراحی بهینه مقرون به صرفه برای چرخه‌های قدرت رانکین با استفاده از منابع حرارتی زمین گرمایی دما پایین ارائه کردند. نسبت مساحت مبدل حرارتی به توان خالص خروجی به عنوان تابع هدف استفاده شده و توسط یک روش نزولی گرادیانی بهینه سازی شد. همچنین در پژوهش آنها عملکرد چرخه در مقایسه با سیالات کاری مانند PF505، پنتان و HCFC123 مورد ارزیابی قرار گرفت. روش بهینه سازی به یک جواب یکتا برای مقادیر دماهای کندانس و تبخیر و سرعت های آب خنک کننده و دمای زمین منتهی شد انتخاب سیال کاری می‌تواند تا حد زیادی بر روی تابع هدف که معیار اندازه گیری هزینه نیروگاه است تاثیر بگذارد و در برخی موارد تفاوت می‌تواند بیش از دو برابر باشد.

تحقیقات آنها نشان داد آمونیاک حداکثر بهره برداری آبهای زمین گرمایی را دارد اما لزوما ماکزیمم کارایی چرخه را ندارد. تجزیه تحلیل اگزرتی نشان می‌دهد که کارایی سیکل آمونیاک تا حد زیادی در فرآیند بهینه سازی نسبت به دیگر سیالات کاری تضمین شده است. پنتان نسبت به PF505 عملکرد بهتری دارد. اگرچه دومی از خواص فیزیکی و شیمیایی بهتری نسبت به HCFC123 و دیگر سیالات مطرح شده دارد. همچنین حضور بخار مرطوب در انتهای انبساط و فشار بخار بالا استفاده از آمونیاک را در کاربرد زمین گرمایی دما پایین محدود می‌کند.[۱۹]

گانگ<sup>۵</sup> و لی جینگ<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۰ به تجزیه تحلیل تولید الکتریسیته حرارتی خورشیدی دما پایین با استفاده از چرخه احیا کننده آلی رانکین پرداخته اند. در پژوهش آنها یک پیکر بندی جدید جهت تولید الکتریسیته حرارتی خورشیدی دما پایین با استفاده از چرخه احیا کننده آلی رانکین ارائه شده است. سیکل رانکین آلی و احیا کننده طراحی شده در مقاله آنها ترکیبی از کاهش انتقال حرارت برگشت ناپذیر

<sup>1</sup> Nishith B. Desai

<sup>2</sup> Santanu Bandyopadhyay

<sup>3</sup> B. MOHANTY

<sup>4</sup> G. PALOSO JR

<sup>5</sup> Pei Gang

<sup>6</sup> Li Jing

و مخازن حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده است. این نوع پیکربندی خلاقانه از مزایای این نوع سیستم تولید توان می‌باشد.

شبیه سازی عددی انتقال حرارت و فرایندهای تبدیل انرژی بر اساس پارامترهای توزیع انجام شده است و به طور کلی کارایی الکتریسیته تولیدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. سپس تاثیرات سیکل احیا بر روی کلکتور مورد بررسی قرار گرفته که نتایج نشان دهنده اثرات منفی بر روی کلکتور می‌باشد با این وجود سیکل احیا دارای اثرات مثبت بر روی کارایی سیکل ترکیبی نیز می‌باشد. همچنین تحقیقات آنها نشان می‌دهد که کارایی حداکثر هم برای توان الکتریکی در شرایط تابش ثابت، و هم دمای تبخیر و دمای محیط ثابت زمانی به وجود می‌آید که دمای احیا کننده در بین دمای ۲۰-۱۲ درجه سانتی گراد باشد. در ضمن کارایی الکتریسیته سیکل رانکین آلی و احیا کننده در حدود ۸.۶٪ است. این مقدار در سیکل رانکین آلی بدون احیا ۴.۹٪ درصد می‌باشد. (رنج دمایی از دمای کندانس تا دمای تبخیر)

همچنین تحقیقات آنها نشان داد یک دمای احیا کننده مطلوب وجود دارد که سیکل رانکین آلی به حداکثر مقدار بازدهی خود می‌رسد. بیشترین مقدار بازدهی ۹.۲٪ به دست آمده است. همچنین یک دمای بهینه وجود دارد که در آن کارایی الکتریسیته سیستم به مقدار ماکزیمم خود میرسد. (۱۲ تا ۲۱ درجه سانتی گراد) [۲۰]

هتیراچی و همکاران عملکرد اقتصادی سیکل رانکین آلی با سیالات HFC123، R 717 و همچنین ان پنتان<sup>۱</sup> را بررسی کردند. در پژوهش آنها نسبت کل مساحت مبدل حرارتی به خروجی توان خالص به عنوان تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت با استفاده از الگوریتم تکامل تدریجی بهینه سازی انجام شد درجه حرارت تبخیرکننده و کندانسور، دبی سیال زمین گرمایی و دبی آب خنک کننده به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. انتخاب سیال عامل تا حد زیادی بر تابع هدف (مساحت به توان) و هزینه اثر گذار است نتایج مدلسازی آنها نشان داد آمونیاک دارای حداقل مقدار برای تابع هدف تابع و حداکثر استفاده از آب زمین گرمایی است [۲۱].

نافی و شرف عملکرد چندین سیال آلی مختلف را در سیکل رانکین آلی بامحرک انرژی خورشیدی بررسی کردند واحدهای فرآیند پیشنهادی مدلسازی شده توسط آنها تطابق خوبی با نتایج دیگر محققان در این زمینه دارد. تجزیه و تحلیل انرژی و هزینه برای شرایط اشباع و شرایط عملیاتی فوق اشباع انجام گرفت. راندمان انرژی، تخریب انرژی کل، تأثیر حرارتی و هزینه خاص سرمایه برای فرآیند تولید بخار مستقیم (DVG) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد سیال تولوئن و آب حداقل مقدار را برای مساحت سطح کلکتور خورشیدی، و به طور خاص کمترین هزینه کل و میزان کمترین تخریب

<sup>۱</sup> N-pentane

اگزردی را ارائه میدهند. [۲۲]. هبرل و بوگمن یک الگوریتم برای بهینه‌سازی قدرت خروجی سیکل رانکین آلی طراحی کردند و R227ea و ایزوپنتان<sup>۱</sup> را به عنوان بهترین سیالات معرفی کردند [۲۳]. دای و همکاران عملکرد ۱۰ سیال آلی مختلف را در سیکل رانکین آلی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از R236ea میتوان به بالاترین بازده اگزردی دست یافت. نتایج تحقیق آنها نشان داد اضافه کردن مبدل حرارتی داخلی به سیکل orc نمی تواند سبب بهبود کارایی سیستم تحت شرایط ارائه شده در آن تحقیق (استفاده از گزماي اتلافي) شود. همچنین نتایج آنها نشان داد سیال عامل با شیب منفی در نقطه بخار اشباع زمانی بهترین کارایی را دارد که سیال وارد شده به توربین در وضعیت بخار اشباع باشد (x=1) [۲۴].

الکساندرا و همکاران عملکرد سیکل رانکین آلی با محرک انرژی زمین گرمایی در بازه ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس را بررسی کردند و R236fa را به عنوان بهترین سیال معرفی نمودند [۲۵]. گو و همکاران عملکرد سیکل رانکین آلی با محرک آب گرم در رنج دمای ۷۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس را آزمایش و R600a را به عنوان بهترین سیال معرفی کردند [۲۶]. ژانک و همکاران سیکل رانکین خورشیدی با سیال دی اکسید کربن را مورد بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این سیکل قابلیت بالایی برای تولید الکتریسیته از انرژی دمایی خورشیدی دارد [۲۷]. لیو و چن اثر تغییر سیال آلی مورد استفاده در سیکل رانکین آلی را بر روی بازده انرژی سیکل بررسی کردند و نشان دادند سیالات آلی تر برای استفاده در این سیکل، چندان مناسب نیستند [۲۸]. هونگ یک مطالعه بر مبنای مقایسه عملکرد سیال آلی خشک، تر و تک آنروپی در سیکل رانکین آلی انجام داد و سیال آلی تک آنروپی را به عنوان بهترین انتخاب معرفی کرد [۲۹]. تچانچ و همکاران عملکرد و خواص ترمودینامیکی ۲۰ سیال مختلف را در سیکل رانکین آلی خورشیدی دمایی بررسی و R134a را به عنوان بهترین گزینه معرفی کردند [۱۰]. هونگ و همکاران بازده انرژی و برگشت ناپذیری را در سیکل رانکین آلی با محرک گرمای اتلافي بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که p-xylene بهترین عملکرد را دارد [۳۰]. الجوندی بازده انرژی و بازده اگزردی را در مورد عملکرد سیکل ملاک قرار داد و به این نتیجه رسید که در بین سیالات مورد مطالعه ان هگزان<sup>۲</sup> بهترین و R277ea بدترین عملکرد را دارند [۳۱]. چن و همکاران نشان دادند که سیکل فوق بحرانی دی اکسید کربن در مقایسه با سیکلی R123 عملکرد بهتری در خصوص قدرت خروجی دارد [۳۲]. روی و همکاران بهینه‌سازی پارامتری را درباره سیکل رانکین آلی با محرک گرمای اتلافي انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که R123 بهترین عملکرد را از منظر بازده دارد [۸]. رشیدی و همکاران عملکرد سیکل رانکین آلی با زیاب را نسبت به توابع هدف بازده انرژی و بازده اگزردی بهینه‌سازی پارامتری کردند [۳۳]. هی و همکاران یک رابطه تئوری برای به

<sup>۱</sup> Isopentane

<sup>۲</sup> n-hexane

دست آوردن دمای مناسب در او اپراتور سیکل رانکین آلی ارائه کردند [۳۴]. وانگ و همکاران یک سیکل ترکیبی متشکل از سیکل رانکین آلی و سیکل تراکمی بخار را از منظر بازده انرژی بررسی کردند [۳۵]. لی و همکاران یک سیکل رانکین آلی همراه با اجکتور را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که به کمک اجکتور می‌توان به بازده و کار خروجی بالاتری دست یافت [۳۶].

ال سلیمان و همکاران عملکرد سیکل سه گانه (با قابلیت تولید سرما، گرما و آب گرم) با کمک سیکل رانکین آلی را از منظر انرژی و انرژی اقتصادی بررسی کردند [۳۷]. وانگ و همکاران ترکیب کلکتور صفحه تخت و سیکل رانکین آلی بازیاب را از منظر انرژی و با استفاده از سیالات مختلف بهینه‌سازی کردند [۳۸] الامام و دینسر سیکل رانکین آلی با استفاده از سیال ایزوبوتان<sup>۱</sup> و با انرژی محرک زمین گرمایی در محدوده ۱۶۰ تا ۱۷۵ درجه سلسیوس را از منظر انرژی اقتصادی بررسی و تحلیل پارامتری کردند [۳۹].

---

<sup>۱</sup> Isobutane

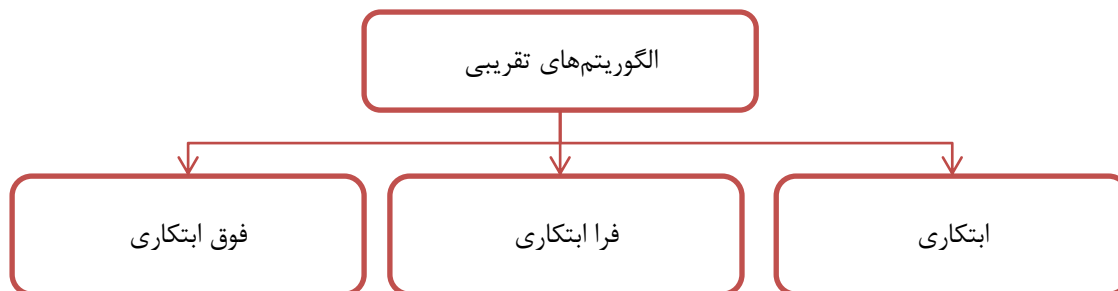
## **فصل سوم**

### **الگوریتم بهینه کننده**

### ۳-۱- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم‌های فراابتکاری نوعی از الگوریتم‌های ریاضی هستند که به کمک آنها میتوان پاسخ بهینه را یافت روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق<sup>۱</sup> و الگوریتم‌های تقریبی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند.

الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی ندارند و زمان حل آنها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت می‌باشد. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری<sup>۳</sup> و فراابتکاری<sup>۴</sup> و فوق ابتکاری<sup>۵</sup> بخش‌بندی می‌شوند.



شکل ۳-۱- دسته‌بندی الگوریتم‌های تقریبی

دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، قرار گرفتن آنها در بهینه‌های محلی، و ناتوانی آنها برای کاربرد در مسائل گوناگون است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برون رفت از بهینه محلی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل هستند. رده‌های گوناگونی از این نوع الگوریتم در ده‌های اخیر توسعه یافته است.

<sup>۱</sup> exact

<sup>۲</sup> Approximate

<sup>۳</sup> heuristic

<sup>۴</sup> meta-heuristic

<sup>۵</sup> hyper heuristic

## ۲-۲- دسته‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری

معیارهای مختلفی می‌تواند برای طبقه‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود:

**مبتنی بر یک جواب و مبتنی بر جمعیت :**

الگوریتم‌های مبتنی بر یک جواب در حین فرایند جستجو یک جواب را تغییر می‌دهند، در حالی که در الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت در حین جستجو، یک جمعیت از جواب‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

**الهام گرفته شده از طبیعت و بدون الهام از طبیعت:**

بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری از طبیعت الهام گرفته شده‌اند، در این میان برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری نیز از طبیعت الهام گرفته نشده‌اند.

**با حافظه و بدون حافظه:**

برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری فاقد حافظه می‌باشند، به این معنا که، این نوع الگوریتم‌ها از اطلاعات بدست آمده در حین جستجو استفاده نمی‌کنند (به طور مثال تبرید شبیه‌سازی شده). این در حالی است که در برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر جستجوی ممنوعه از حافظه استفاده می‌کنند. این حافظه اطلاعات بدست آمده در حین جستجو را در خود ذخیره می‌کند.

**قطعی و احتمالی:**

یک الگوریتم فراابتکاری قطعی نظیر جستجوی ممنوعه، مسئله را با استفاده از تصمیمات قطعی حل می‌کند. اما در الگوریتم‌های فراابتکاری احتمالی نظیر تبرید شبیه‌سازی شده، یک سری قوانین احتمالی در حین جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**الگوریتم‌های فراابتکاری بر پایه جمعیت:**

از الگوریتم‌های شناخته شده فراابتکاری بر پایه جمعیت می‌توان الگوریتم‌های تکاملی (الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک، ...)، بهینه‌سازی کلونی مورچگان، کلونی زنبورها، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم رقابت استعماری، و الگوریتم چکه آبهای هوشمند را نام برد.

**الگوریتم‌های متداول فراابتکاری مبتنی بر یک جواب:**

از الگوریتم‌های متداول فراابتکاری مبتنی بر یک جواب می‌توان الگوریتم جستجوی ممنوعه و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده را نام برد.

**پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری :**

فرایند طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری دارای سه مرحله‌ی متوالی است که هر کدام از آن‌ها دارای گام‌های مختلفی هستند. در هر گام فعالیت‌هایی باید انجام شود تا آن گام کامل شود. مرحله‌ی ۱ آماده‌سازی است که در آن باید شناخت دقیقی از مسئله‌ای که می‌خواهیم حل کنیم بدست



آوریم، و اهداف طراحی الگوریتم فراابتکاری برای آن باید با توجه به روش‌های حل موجود برای این مسئله به طور واضح و شفاف مشخص شود. مرحله‌ی بعدی، ساخت نام دارد. مهمترین اهداف این مرحله انتخاب استراتژی حل، تعریف معیارهای اندازه‌گیری عملکرد، و طراحی الگوریتم برای استراتژی حل انتخابی می‌باشد. آخرین مرحله پیاده‌سازی است که در آن پیاده‌سازی الگوریتم طراحی شده در مرحله‌ی قبل، شامل تنظیم پارامترها، تحلیل عملکرد، و در نهایت تدوین و تهیه گزارش نتایج باید انجام شود.

### ۳-۳- تاریخچه الگوریتم ژنتیک

در پنجاه سال اخیر به‌طور گسترده از کامپیوتر در علوم مختلف استفاده می‌شود. در اواسط قرن بیستم برخی از دانشمندان علوم کامپیوتر کار بر روی سیستم‌های تکاملی را به امید آنکه بتوان از آن به‌عنوان مکانیسمی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده نمود، آغاز نمودند. در دهه هفتاد میلادی دانشمندی از دانشگاه میشیگان به نام جان هالند ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی‌های مهندسی مطرح کرد، به علاوه دانشجویان و همکارانش با همکاری هم این الگوریتم را توسعه دادند [۴۱]. از الگوریتم ژنتیک بواسطه قدرت و کفایت و سادگی آن، در رشته‌های مختلف علمی استفاده شده است. برای مثال از آن برای حل مسائلی که تابع هدف پیچیده و تعداد متغیر مستقل زیاد دارند به وفور استفاده می‌شود. به‌طور کلی، در بیست سال اخیر، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک تکنیک بهینه برای توابع پیچیده مورد توجه قرار گرفته است و کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف موردبررسی قرار می‌گیرد. [۴۰]

الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> سرآمد روش‌های تکاملی است و الگوریتم‌های جستجو الهام گرفته از تکامل بیولوژیکی می‌باشد [۴۱ و ۴۲]. الگوریتم ژنتیک در مسایلی که ما با فضای بزرگی برای یافتن بهترین جواب رو به رو هستیم بهترین کارایی را دارند. البته این نکته قابل ذکر است که الگوریتم ژنتیک برای هر مسئله قابل پیاده‌سازی است. و بر خلاف دیگر روش‌های بهینه‌سازی که اغلب نیازمند داشتن مشتق تابع هدف نیز هستند این روش هیچ گونه نیازی به اطلاعات اضافه ندارد و پیاده‌سازی آن بسیار ساده است. در ادامه به مفاهیم آن و روش کار این الگوریتم پرداخته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> GA

### ۳-۳-۱- تعریف الگوریتم ژنتیک و مفهوم آن

الگوریتم ژنتیک بر اساس نظریه تکاملی داروین بنا نهاده شده است و جواب مساله‌ای که از طریق الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید گام به گام بهبود می‌یابد. الگوریتم ژنتیک با یک مجموعه از جواب‌ها که جمعیت نامیده می‌شود کار خود را شروع می‌کند. در واقع این مجموعه جواب‌ها جمعیت<sup>۱</sup> نام دارد. به عبارت دیگر جمعیت از تعداد مشخصی از نفرات تشکیل شده است. که هر نفر نماینده یک جواب مسئله است. ما بدنال یافتن بهترین نفر (بهترین جواب) در طی فرآیند بهینه‌سازی هستیم.

در این الگوریتم جواب‌های مربوط به یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می‌شوند. الگوریتم روند کاوش و جستجوی خود را به امید یافتن جوابهای بهتر نسل به نسل ادامه می‌دهد تا زمانی که به یکی از شرایط توقف خود برسد. در این فرآیند امید است که جمعیت جدید (فرزندان<sup>۲</sup>) نسبت به جمعیت قبلی (والدین<sup>۳</sup>) بهتر باشند. در هر نسل جواب‌های جدیدی ساخته می‌شود که می‌بایست بهینه بودن آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. میزان بهینه بودن یک جواب به کمک تابع هدف سنجیده می‌شود. به عبارت دیگر جوابهای جدید (فرزندان) به کمک والدین شایسته از نسل قبل ساخته می‌شوند. والدینی که بر اساس تابع هدف از شایستگی مناسبی برخوردار نیستند رفته رفته حذف می‌شوند و در فرآیند تولید فرزند مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. مطابق با آنچه گفته شد طبیعی است که جواب‌های مناسب تر شانس بیشتری برای تولید فرزند دارند. این فرآیند تا برقراری شرایط توقفی که از قبل تعیین می‌شود (مانند تعداد جمعیت ها یا میزان بهبود جواب) ادامه پیدا خواهد کرد. در ادامه شماتیکی<sup>۰</sup> جهت تعریف مفاهیم پایه الگوریتم ژنتیک آورده شده است.

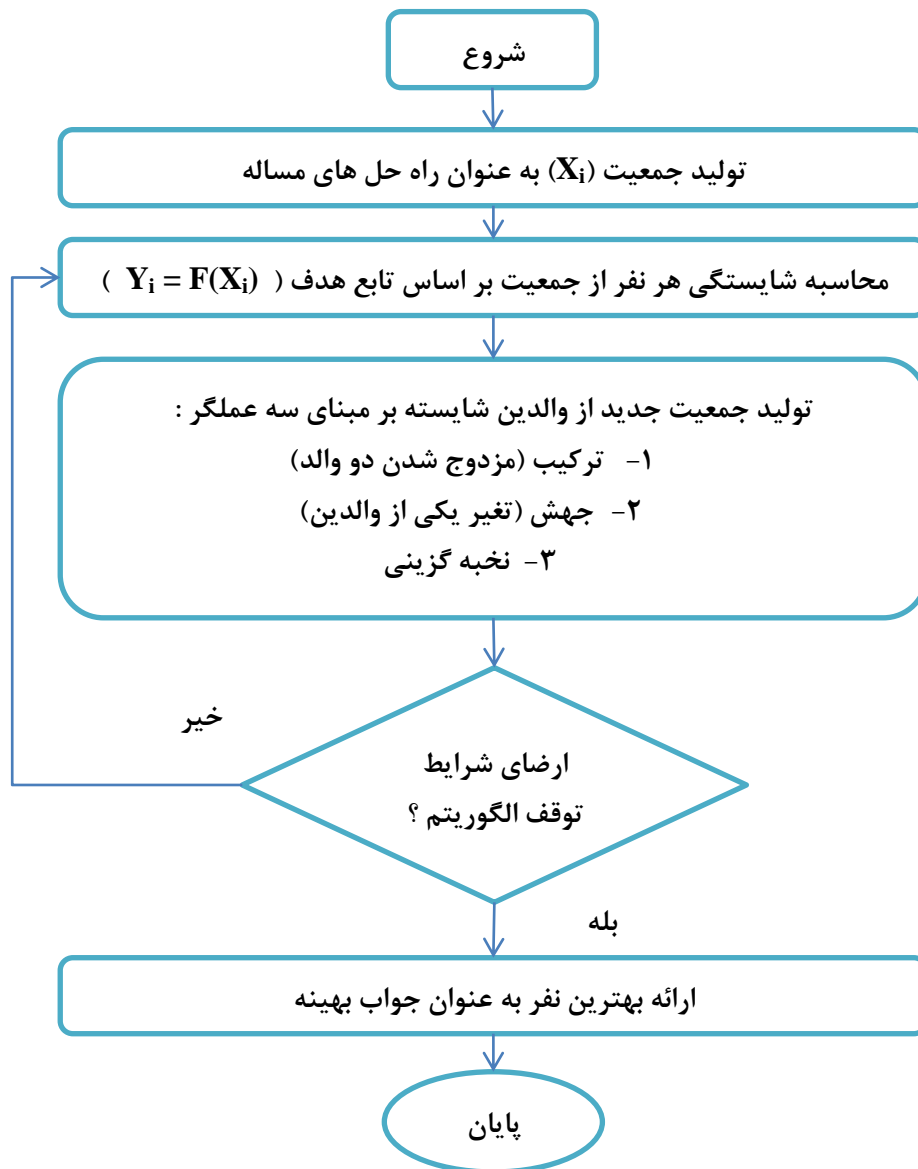
### ۳-۳-۲- روند اجرا در الگوریتم ژنتیک

در شکل (۲-۳) نمای کلی الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، اصول پایه ای الگوریتم ژنتیک بسیار عمومی است و می‌توان از آن برای انواع مسایل بهینه‌سازی مهندسی استفاده کرد و تنها تفاوت، به کار گرفتن توابع هدف مختلف بنا بر نیاز مساله‌ی است.

<sup>۱</sup> Population

<sup>۲</sup> Offspring

<sup>۳</sup> parents



شکل ۳-۲- فلوچارت الگوریتم ژنتیک و روند کار آن در حل مسایل مختلف بهینه سازی

مطابق ۰ سه عملگر مهم برای تولید جواب های جدید از جواب های نسل قبل وجود دارد این سه عملگر بسیار مهم و پایه ای الگوریتم ژنتیک عملگرهای ترکیب<sup>۱</sup> و جهش<sup>۲</sup> و نخبه گزینی<sup>۳</sup> هستند. سوال بعدی این است که برای ترکیب والدین به منظور ایجاد فرزندان جدید والدین چگونه انتخاب شوند؟ این کار به روشهای مختلفی میتواند صورت گیرد. اما ایده اصلی در تمام آنها این است که والدین بهتر (والدین شایسته) انتخاب شوند به این امید که والدین بهتر باعث ایجاد فرزندان بهتر شوند. برای عملگر دوم یعنی جهش نیز از والدین شایسته برای تولید فرزندان استفاده می شود مساله ای که در این جا مورد سوال می باشد این است که اگر جمعیت جدید تنها از طریق فرزندان جدید ایجاد شود، این

<sup>۱</sup> Cross over

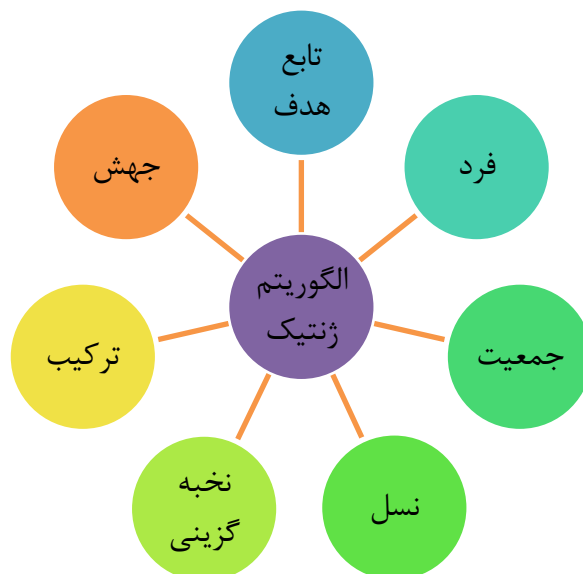
<sup>۲</sup> Mutation

<sup>۳</sup> Elite

فرآیند منجر به حذف والدین نسل قبل می‌گردد. برای جلوگیری از این پیشامد، همیشه بهترین جواب نسل قبل بدون هیچ تغییری به نسل جدید منتقل می‌شود (عملگر نخبه‌گزینی).

### ۳-۳-۳- اصطلاحات کاربردی در الگوریتم ژنتیک

در ۰ اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک به اختصار آمده است. که در بخشهای بعدی به تفسیر هر کدام از آنها توضیح داده می‌شود.



شکل ۳-۳- اصطلاحات کاربردی الگوریتم ژنتیک

### ۳-۳-۳-۱- تابع هدف (تابع شایستگی)

یکی از مراحل الگوریتم ژنتیک ارزیابی جواب‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله است. در واقع ارزش جواب‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله تعیین می‌شود. مناسب بودن یا نبودن جواب با معیاری که از تابع هدف به دست می‌آید، سنجیده می‌شود. هرچه که یک جواب مناسب‌تر باشد مقدار شایستگی بیشتری دارد که با استفاده از محدوده دانش مسئله به کار برده می‌شود. برای آن‌که شانس بقای چنین جوابی بیشتر شود احتمال بقای آن متناسب با مقدار برازندگی آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین رشته‌ای که برازنده‌تر است با احتمال بیشتری در تولید فرزندان شرکت می‌کند و دنباله‌های بیشتری را به وجود می‌آورد. با ارزش‌ترین جواب‌ها در هر مرحله مانند قویترین موجودات در یک جمعیت می‌باشند. در تکثیر، رشته‌های با میزان تطبیق کم، از جمعیت حذف می‌شوند و رشته‌های با میزان تطبیق زیاد، تأثیر بیشتری در تولید جمعیت بعدی خواهند داشت.

### ۳-۱-۲- مثال برای فهم بهتر روند کار در الگوریتم ژنتیک

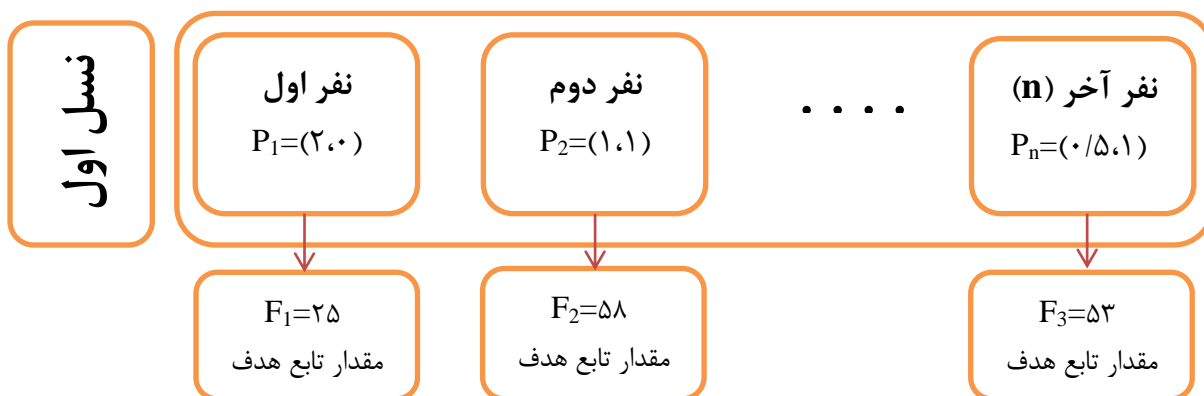
یک فرد عبارت است یک راه حل مسئله. مقدار شایستگی به ازای هر فرد، امتیاز آن فرد تلقی می-شود. به عنوان مثال تابع هدف به صورت معادله زیر را در نظر بگیرید که  $x_1$  و  $x_2$  دو متغیر مستقل مسئله باشند. در این مثال هدف از بهینه سازی مینیمم کردن این تابع هدف است.

$$F(x_1, x_2) = (2x_1 + 1)^2 + (3x_2 + 4)^2 \quad (1-3)$$

بردار  $(x_1, x_2) = (0, 2)$  یک فرد تلقی می شود. مقدار شایستگی یک فرد نیز به کمک تابع هدف محاسبه می گردد،  $F(2, 0) = 25$  بردار  $(1, 1)$  نیز یک راه حل ممکن می تواند باشد (نفر دوم) که در واقع مقدار تابع هدف آن برابر است با  $F(1, 1) = 58$ . نفر اول از نفر دوم شایسته تر است زیرا  $(25 < 58)$  در واقع نفر اول مقدار تابع هدف کوچکتری دارد و از آنجا که هدف مینیمم کردن است بنابراین هرچقدر مقدار تابع هدف کوچکتر باشد امتیاز آن فرد بالاتر است. از آنجا که جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک مینیمم تابع شایستگی را تعیین می کند، بهترین مقدار شایستگی برای کوچکترین مقدار تابع هدف از کل جمعیت می باشد.

### ۳-۳-۲- جمعیت و نسل ها

جمعیت یک آرایه از افراد است. یک فرد ممکن است چندین بار در یک جمعیت تکرار شود. در هر تکرار، الگوریتم ژنتیک یک سری محاسبات روی جمعیت حاضر انجام داده و جمعیت جدید را تولید می کند. این جمعیت جدید تحت عنوان یک نسل جدید شناخته می شود.



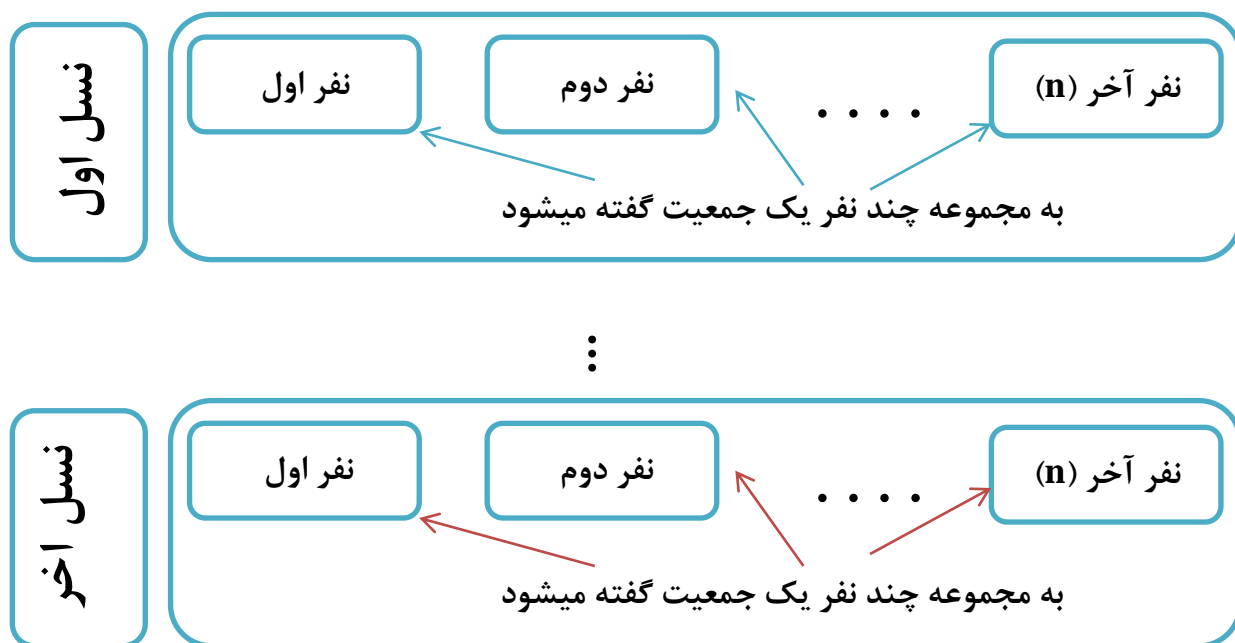
به مجموعه چند نفر یک جمعیت گفته میشود

در بین این سه نفر، نفر اول بیشترین امتیاز، نفر دوم کمترین امتیاز را دارد زیرا:  $(25 < 53 < 58)$

شکل ۳-۴- در شکل بالا مفهوم نفر و جمعیت و نسل به خوبی نشان داده شده است

### ۳-۳-۳-۳- والدین و فرزندان

برای تولید نسل بعدی، الگوریتم ژنتیک تعداد خاصی از افراد جمعیت حاضر را که از آن‌ها تحت عنوان والدین یاد می‌شود، انتخاب می‌کند. والدین برای تولید افراد نسل بعدی که از آن تحت عنوان فرزندان یاد می‌شود، استفاده می‌گردند. الگوریتم ژنتیک تمایل به انتخاب افرادی تحت عنوان والدین دارد که مقدار شایستگی بهتری (بر مبنای تابع هدف) نسبت به سایرین داشته باشند. از این میان نیز، تعداد افراد با بهترین مقدار شایستگی در جمعیت حاضر، که بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند فرزندان نخبه نامیده می‌شوند. در شکل زیر شماتیک نسل، جمعیت، نفر، والدین و فرزندان آورده شده است.



تذکر : افراد نسل جدید فرزندان نسل قبلی محسوب میشوند

شکل ۳-۵- تعاریف نفر جمعیت و نسل والدین و فرزندان

### ۳-۳-۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک دارای روند تکراری بوده که جستجو را با جمعیتی از راه‌حل‌های اولیه تصادفی آغاز می‌کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، عملگرهای ژنتیک در تولید نسل بعدی به کار گرفته می‌شوند تا جمعیت به روز شود. این الگوریتم از سه عملگر نخبه‌گزینی<sup>۱</sup>، ترکیب<sup>۲</sup> و جهش<sup>۱</sup> برای تولید

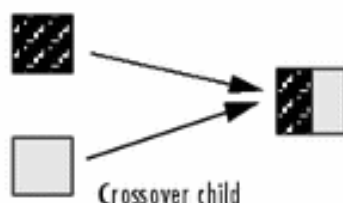
<sup>۱</sup> elite

<sup>۲</sup> Crossover

افراد نسل بعدی استفاده می‌نماید. والدینی که مقدار تابع هدف بهتری دارند شانس انتخاب شدن بیشتری برای تولید نسل بعدی دارند. برای تضمین اینکه همواره بهترین اعضا در نسل بعدی حضور خواهند داشت معمولاً ۲ تا ۵ درصد جمعیت که دارای بهترین مقادیر شایستگی هستند با عنوان فرزندان نخبه، بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌شوند. عملیات ترکیب الگوریتم را قادر می‌سازد تا بهترین ژن‌ها را از افراد مختلف استخراج کرده و آن‌ها را در قالب فرزندان ممتازتر دوباره ترکیب کنند. عملیات جهش منجر به افزایش گوناگونی در جمعیت می‌شود. گوناگونی سبب می‌گردد الگوریتم ناحیه‌ی بزرگتری را مورد جستجو قرار دهد و در نتیجه کارایی الگوریتم افزایش یابد. بدون جهش الگوریتم تنها قادر به تولید فرزندانی است که ژن‌های آن‌ها زیر مجموعه‌ای از ژن‌های جمعیت آغازین هستند. این وابستگی بالا به جمعیت آغازین باعث کاهش کارایی الگوریتم در بهینه‌سازی خواهد شد. انجام عمل جهش همچنین، مانع از همگرا شدن الگوریتم و ورود آن به نواحی مینیمم محلی مسئله می‌شود. در ادامه توضیحات مختصری در مورد عملگر ترکیب و جهش و نخبه‌گزینی در ادامه توضیح داده می‌شود.

### ۳-۴-۱- عملگر ترکیب (تلفیق)

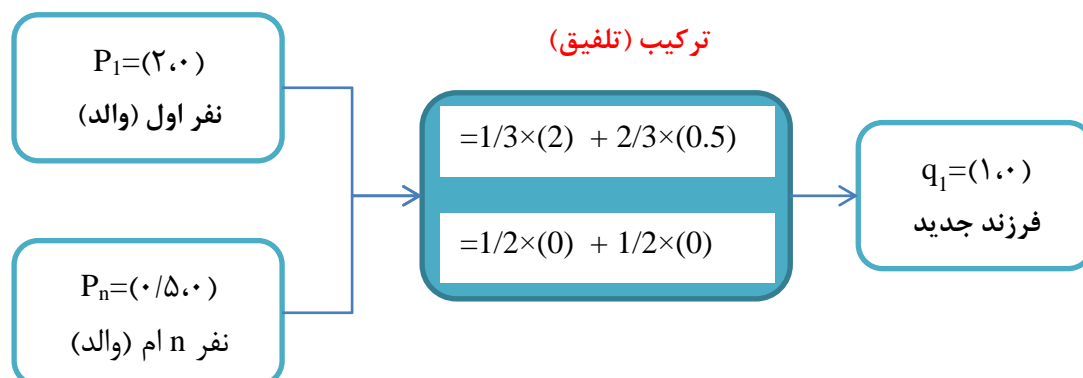
در واقع عملگر ترکیب یک روش برای اشتراک اطلاعات مابین نفرات می‌باشد. این عملگر خصیصه‌های والدین را برای ساختن فرزندان ترکیب می‌کند تا این که فرزندان بهتری ایجاد شوند. ممکن است فرزندان بهتری تولید شود و یا ممکن است و دو فرزند برای هر جفت تولید می‌شود. عملگر ترکیب می‌تواند روی چندین والد نیز عمل کند که در این صورت خصیصه‌های بیش از دو والد را برای تولید فرزندان ترکیب می‌کند. علاوه بر این عملگر ترکیب می‌تواند بیش از دو فرزند را برای هر گروه از والدین تولید کند. وظیفه اصلی این عملگر بهبود شایستگی جمعیت می‌باشد. پیاده‌سازی این عملگر به روش مختلفی وابسته است. در ادامه، برای فهم بهتر مثالی آورده خواهد شد نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که عملگر ترکیب ممکن است منجر به ایجاد فرزند بهتر نشود.



شکل ۳-۵- عملگر ترکیب (تلفیق) برای تولید یک فرزند از دو والد شایسته

<sup>1</sup> Mutation

فرض کنید در مثال قبل بخواهیم به با استفاده از نفر اول ( $p_1$ ) و نفر دوم ( $p_2$ ) و به کمک عملگر ترکیب فرزندی تولید کنیم. یکی از ساده‌ترین روش‌ها این است. که میانگین وزن دار از دو نفر بگیریم.



شکل ۳-۶- تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم

مطابق ۰ به کمک دو والد در نسل قدیم یک فرزند در نسل جدید ایجاد شد. این کار از طریق میانگین وزن دار صورت گرفت. روش‌های مختلفی برای ترکیب کردن وجود دارد که نمونه‌ای از آن در بالا توضیح داده شد

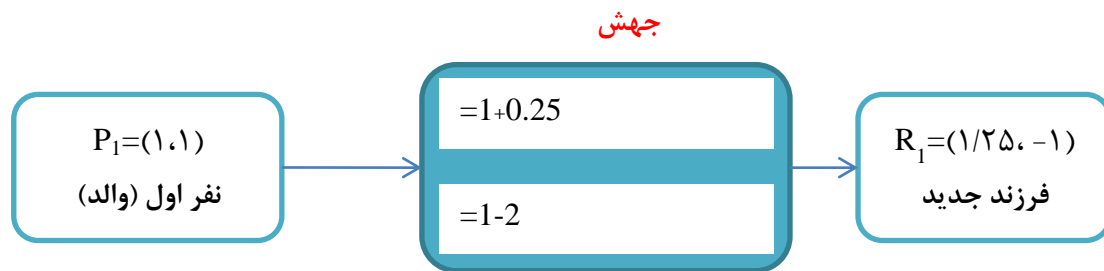
### ۳-۴-۲- جهش

بعد از اعمال عملگر ترکیب به منظور اجتناب از همگرایی به بهینه محلی و ایجاد تنوع و گوناگونی در جمعیت، با استفاده از عملگر جهش می‌توان تغییر کوچکی در تعدادی از والدین شایسته تا فرزندان جدیدی حاصل شود. با این عمل نفرات جدیدی در کل جمعیت به وجود می‌آید، که ممکن است فرزندان شایسته‌تر از والدین باشد و یا بالعکس. در مثالی که در بخش‌های آتی آورده می‌شود این عملگر نیز توضیح داده می‌شود.



شکل ۳-۷- عملگر جهش برای تولید یک فرزند از یک والد شایسته





شکل ۳-۸- تولید فرزند جدید از دو والد در نسل قدیم

همانطور که مشاهده میکنید اپراتور جهش مقداری مثبت یا منفی به والدین نسل قبلی اضافه می‌کند. به عنوان مثال فرزند ایجاد شده به کمک جهش در مثال قبل  $R_1 = (1/25, -1)$  نسبت به والدین خود شایسته تر است و به جواب بهینه نزدیکتر است زیرا میزان تابع هدف آن  $(F(1/25, -1) = 13/25)$  است که نسبت به دیگر نفرات قبلی وضعیت مطلوب تری دارد (مینیمم تر است). عملگر جهش نسل به نسل سبب تولید نفرات جدید می‌شود که ممکن است وضعیت بهتری نسبت به والد خود داشته باشد. به طور خلاصه، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می‌کند، که طرح کلی آن به این صورت است:

۱- الگوریتم با تولید یک جمعیت آغازین که به صورت تصادفی تولید می‌شوند کار خود را آغاز می‌کند.

۲- سپس در ادامه یک ترتیب از جمعیت جدید را ایجاد می‌نماید (نسل‌ها). در هر گام الگوریتم با به کارگیری سه روش از افراد موجود در نسل حاضر برای تولید افراد نسل بعدی استفاده می‌نماید برای تولید نسل جدید الگوریتم ژنتیک مراحل زیر را انجام می‌دهد:

- به هر عضو از جمعیت حاضر یک امتیاز اختصاص می‌دهد این کار با محاسبه مقدار شایستگی هر یک از افراد حاضر در جمعیت انجام می‌شود.
- امتیازهای شایستگی به دست آمده به کمک مقیاس بندی به محدوده قابل استفاده تری از مقادیر تبدیل می‌شوند.

- والدین بر اساس میزان شایستگی های اختصاص یافته به افراد انتخاب می‌شوند. در واقع از افراد شایسته تر به عنوان والدین استفاده می‌شود.

- فرزندان به کمک والدین تولید می‌گردند. فرزندان با ایجاد تغییر تصادفی روی یکی از والدین (جهش) و یا با ترکیب بردارهای مربوط به هر دوی والدین (تلفیق) تولید می‌شوند.
- جمعیت حاضر با فرزندان جایگزین می‌شوند و نسل بعدی شکل می‌گیرد.

۳- الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که یکی از شرایط توقف محقق شود.

### ۳-۳-۵- توابع عملیاتی الگوریتم‌های ژنتیک

همانطور که گفته شد الگوریتم ژنتیک یک رویه تکراری می‌باشد که شامل یک جمعیت با اندازه ثابت است. هر یک از افراد این جمعیت با توجه به یک رشته محدود سمبول‌ها ارائه می‌شوند که از آن‌ها تحت عنوان ژنوم یاد می‌شود. هر یک از ژنوم‌ها یک راه‌حل ممکن در فضای مسئله را کد می‌کنند. از فضای مسئله به فضای جستجو تعبیر می‌شود که این فضا تمام راه‌حل‌های ممکن مسئله را در بر می‌گیرد. عموماً از الگوریتم ژنتیک در مورد مسائلی استفاده می‌شود که فضای جستجوی آن‌ها بسیار بزرگ بوده و روش‌های جستجو معمول در مورد آن‌ها کاربردی ندارد. یک الگوریتم ژنتیک استاندارد به صورت زیر عمل می‌کند:

ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی و یا اکتشافی فراهم آورده می‌شود. هر مرحله‌ی تکاملی یک نسل نامیده می‌شود، هر یک از افراد جمعیت حاضر بر مبنای یک تابع هدف از پیش تعریف شده ارزیابی می‌شوند و نتیجه کار تحت عنوان میزان شایستگی فرد شناخته می‌شود. برای شکل‌گیری یک جمعیت جدید (نسل بعدی) افراد بر مبنای میزان شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. روش‌های مختلفی برای انجام این انتخاب وجود دارند که ساده‌ترین آن‌ها که توسط هالند مطرح شده انتخاب متناسب با شایستگی می‌باشد. در این روش افراد با احتمالی متناسب با میزان شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. به این ترتیب افراد شایسته‌تر چندین بار برای حضور در جمعیت جدید انتخاب شده و به این ترتیب شانس بیشتری برای تولیدمثل خواهند داشت. این در حالی است که افراد با شایستگی کمتر محو شده و شانسی برای انتخاب و تولیدمثل پیدا نمی‌کنند. بنابراین از نزدیک شدن به جواب محلی جلوگیری می‌شود. فرآیند انتخاب بر اساس ارزیابی صلاحیت مدل فردی است. صلاحیت یک مدل فردی مرتبط با هدف تابع می‌باشد و این تابع برای مثال می‌تواند در نتیجه مجموع مربع خطاها مرتبط با اندازه‌گیری تعریف شود.

روال انتخاب به تنهایی نمی‌تواند هیچ فرد جدیدی را به جمعیت اضافه کند و به طبع هیچ نقطه‌ی جدیدی را در فضای جستجو پیدا نمی‌کند. بلکه این کار با استفاده از عملگرهای دیگر الهام گرفته از طبیعت از جمله تلفیق<sup>۱</sup> و جهش<sup>۲</sup> انجام می‌شود. این دو عملگر ژنتیکی در الگوریتم ژنتیک جهت تولید جمعیت جدید بکار می‌روند [۴۳]. تلفیق با توجه به یک احتمال تحت عنوان احتمال تلفیق و یا نرخ تلفیق بین دو فرد انتخاب شده انجام می‌شود. از این دو فرد تحت عنوان والدین یاد می‌شود. عملیات تلفیق از طریق مبادله‌ی اجزای ژنوم دو والد انجام می‌شود و به این ترتیب دو فرد جدید به وجود می‌آیند که از آن‌ها تحت عنوان فرزند یاد می‌شود.

<sup>۱</sup> Crossover

<sup>۲</sup> Mutate

### جدول ۳-۱- شبه کد الگوریتم ژنتیک [۴۴]

مرحله	توضیحات
۱	تولید تصادفی نفرات به عنوان راه حل مسئله
۲	ارزیابی شایستگی هر نفر با استفاده از تابع هدف
۳	مراجله زیر تکرار شود
۴	انتخاب نفرات برتر برای عملیات ترکیب و جهش و انتقال مستقیم
۵	انجام عملیات ترکیب برای تولید فرزندان جدید (راه حل های جدید)
۶	عملیات جهش برای تولید فرزندان جدید (راه حل های جدید)
۷	انتقال مستقیم بهترین والدین به نسل جدید
۸	تکرار مراحل ۴ تا ۷ تا زمانیکه شرایط توقف حاصل شود

عملگر تلفیق باعث می شود تا عملیات جستجو به مناطق جدیدی در فضای جستجو گسترش یابد. عملگر جهش در راستای جلوگیری از همگرایی زودرس در مینیمم های محلی به کار گرفته می شود. این عملگر نقاط جدیدی را به صورت تصادفی در فضای جستجو ایجاد می کند. این عملگر یک تغییر تصادفی را با احتمال اندک در چند بیت از ژنوم اعمال می کند.

الگوریتم ژنتیک یک فرآیند تکراری مبتنی بر شانس است که همگرایی را تضمین نمی کند. شرط پایان تکرار این الگوریتم با توجه به تعداد نسل ها و یا میزان شایستگی مطلوب تعیین می گردد. در \* شبه کد مربوط به یک الگوریتم ژنتیک استاندارد آمده است:

### ۳-۳-۶- مزایای الگوریتم ژنتیک

یکی از نقاط قوت الگوریتم های ژنتیک که در ابتدا یک کمبود به نظر می رسد این است که: GA ها هیچ چیزی در مورد مسائلی که حل می کنند نمی دانند و اصطلاحاً به آن ها «ساعت ساز نابینا» می گوئیم. آن ها تغییرات تصادفی را در راه حل های کاندیدشان می دهند و سپس از تابع برازش برای سنجش این که آیا آن تغییرات پیشرفتی ایجاد کرده اند یا نه، استفاده می کنند. مزیت این تکنیک این است که به GA اجازه می دهد تا با ذهنی باز شروع به حل مسائل کند. از آنجایی که تصمیمات آن اساساً تصادفی است، بر اساس تئوری همه راه حل های ممکن به روی مسئله باز است، ولی مسائلی که محدود و به اطلاعات هستند باید از راه قیاس تصمیم بگیرند و در این صورت بسیاری از راه حل های نو و جدید را از دست می دهند.

یکی دیگر از مزایای الگوریتم این است که آن ها می توانند چندین پارامتر را همزمان تغییر دهند.

بسیاری از مسائل واقعی نمی‌توانند محدود به یک ویژگی شوند تا آن ویژگی ماکسیمم شود و باید چند جنبه در نظر گرفته شوند. GA ها در حل این گونه مسائل بسیار مفیدند، و در حقیقت قابلیت موازی کار کردن آن‌ها این خاصیت را به آن‌ها می‌بخشد. و ممکن است برای یک مسئله ۲ یا چند راه‌حل پیدا شود، که هر کدام با در نظر گرفتن یک پارامتر خاص به جواب رسیده‌اند.

به‌طور خلاصه مزایای الگوریتم ژنتیک را می‌توان در موارد زیر برشمرد:

- ۱- با متغیرهای پیوسته و هم گسسته می‌تواند عمل بهینه‌سازی را انجام دهد.
- ۲- نیازی به محاسبه مشتق توابع ندارد.
- ۳- بطور همزمان می‌تواند تمامی ناحیه جستجو شونده وسیع تابع هزینه را جستجو کند.
- ۴- قادر به بهینه‌سازی مسائل با تعداد متغیرهای زیاد می‌باشد.
- ۵- قابل اجرا از طریق کامپیوترهای موازی است.
- ۶- توابع هزینه‌ای که بسیار پیچیده باشند نیز از این طریق قابل بهینه‌سازی می‌باشند و الگوریتم در اکستریم محلی به دام نمی‌افتد.
- ۷- قادر است تا چند جواب بهینه را بطور همزمان به دست آورد نه فقط یک جواب.
- ۸- الگوریتم‌های ژنتیک بر روی مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها اعمال می‌شوند و نه بر روی یک راه‌حل خاص.
- ۹- قادر است تا متغیرها را کد بندی نموده و بهینه‌سازی را با متغیرهای کد بندی شده انجام دهد. کد بندی سرعت همگرایی الگوریتم را افزایش می‌دهد.
- ۱۰ الگوریتم توانایی کار کردن با داده‌های عددی تولید شده و داده‌های تجربی را علاوه بر توابع تحلیلی دارد.
- ۱۱- فرآیند ارائه شده توسط الگوریتم‌های ژنتیک بر روی فضایی از مجموعه نمایندگان یا همان فضای کروموزوم‌ها اعمال می‌گردد و نه بر روی خود فضای راه‌حل‌ها.
- ۱۲- الگوریتم‌های ژنتیک از قوانین انتقالی احتمالی بجای قوانین انتقالی قطعی استفاده می‌کنند، بدین معنا که حرکت آن در هر نقطه از الگوریتم کاملاً احتمالی بوده و بر اساس قطعیت صورت نمی‌پذیرد. این امر از مزایای مهم این روش بوده و از افتادن سیستم در کمینه محلی جلوگیری می‌نماید. البته میزان احتمال به گونه‌ای است که احتمال حرکت به سمت مسئله بیشتر از احتمال حرکت آن به سمت مخالف جواب می‌باشد.
- ۱۳- تنها ملاک ارزشیابی و سنجش میزان شایستگی هر راه‌حل توسط الگوریتم‌های ژنتیک، مقدار تابع شایستگی آن در فضای کروموزوم‌ها می‌باشد و نه معیارهای مورد نظر در سطح فضای راه‌حل‌ها.
- ۱۴- برای حل برخی از مسائلی از رده NP-Hard (رده بندی مسائل محاسباتی که مجموعه بغرنج

است که حل آن توسط الگوریتمی با زمان چند جمله ای غیر ممکن باشد اگر فقط برای یکی از این مسئله‌ها راه حل سریعی پیدا شود. این راه حل موجب حل سریع بقیه مسئله‌ها خواهد شد (نیز استفاده می‌شود).

۱۵- این الگوریتم بیشتر در مسائل بهینه‌سازی و امثالهم بکار می‌رود.

### **۳-۳-۷- محدودیتهای الگوریتم ژنتیک**

۱- حجم محاسباتی بالا

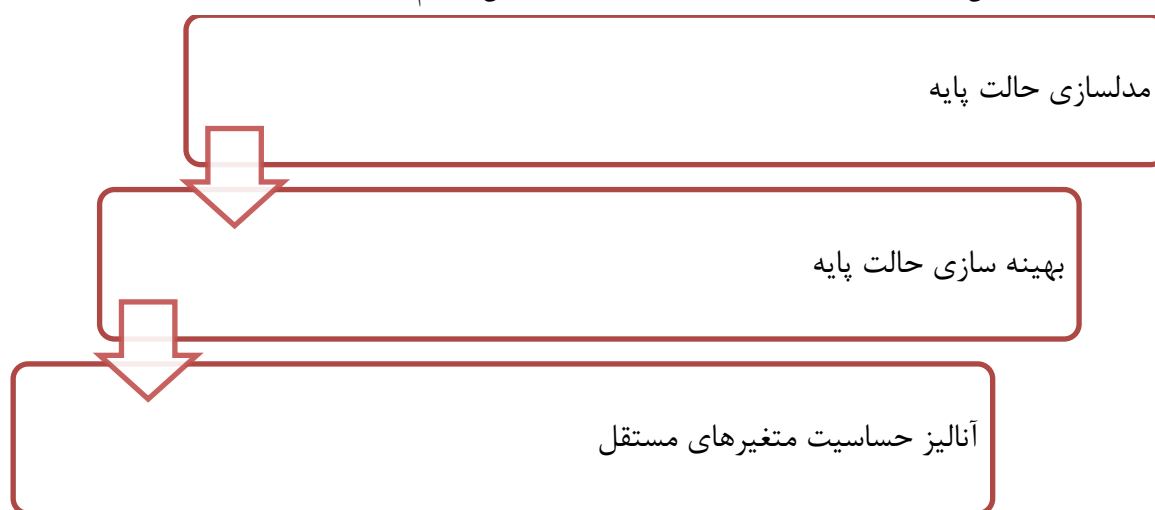
۲- سرعت همگرایی پایین در استخراج جواب ( زمان اجرای طولانی)

## **فصل چهارم**

### **مدلسازی**

## ۴-۱- مقدمه

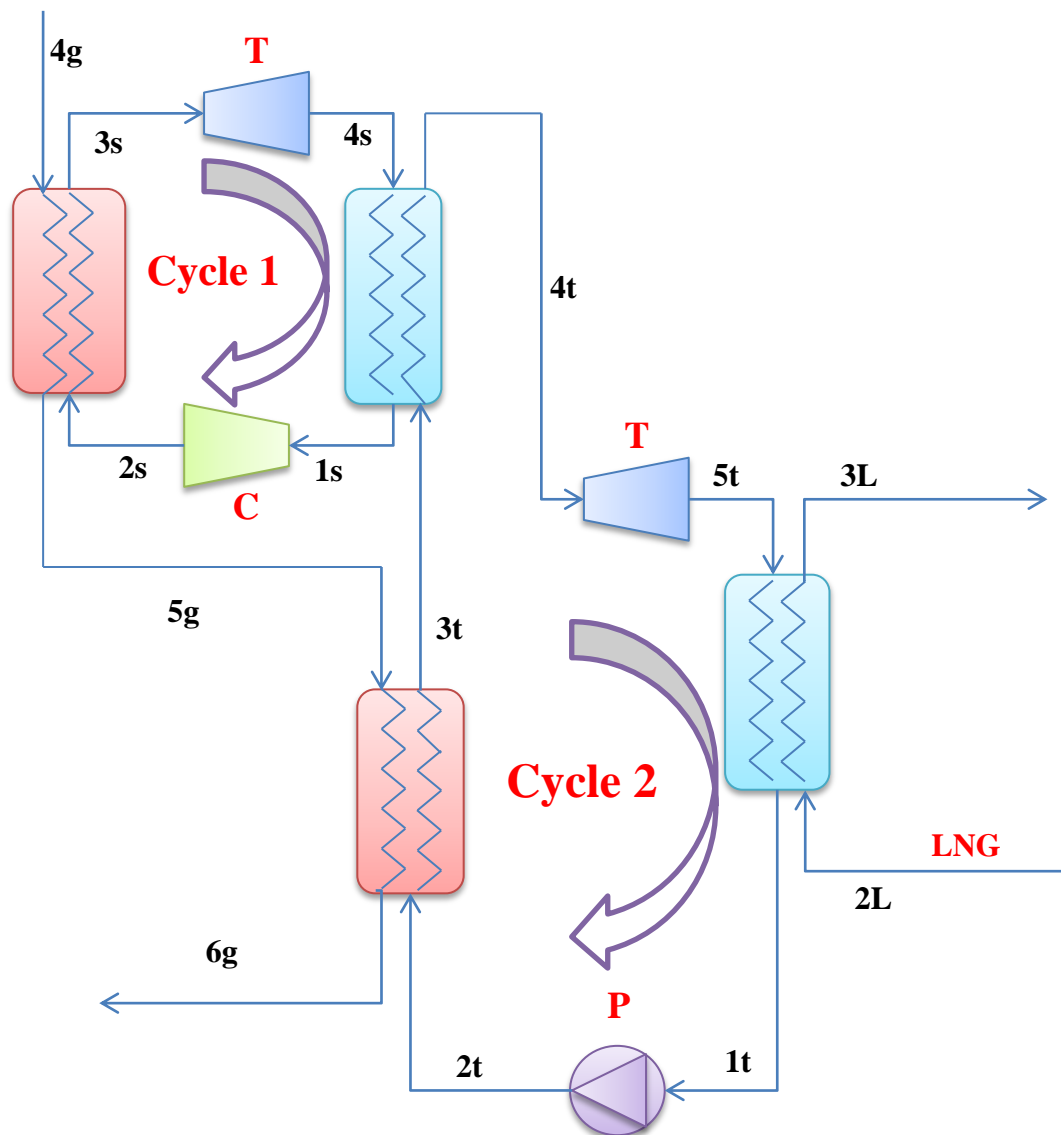
در این پژوهش در گام اول مدلسازی حالت پایه سیکل آبشاری فشار بالا و فشار پایین تحت شرایط ترمودینامیکی خاص صورت میگیرد در وهله دوم مساله بهینه سازی مطرح میگردد و در وهله سوم مطابق نمودار شکل زیر آنالیز حساسیت برای متغیرهای مستقل انجام میگردد.



شکل ۴-۱- مراحل مختلف پیاده سازی در این پژوهش

## ۴-۲- پیکربندی سیکل

پیکربندی سیکل مورد مطالعه در این پژوهش در زیر ارائه شده است. مطابق با این پیکربندی سیکل تولید قدرت بالایی فشار بالا محسوب شده و سیکل تولید قدرت پایین یک سیکل فشار پایین است. سیکل بالا از نوع فوق بحرانی و سیکل پایین از گذرا است. منبع حرارت دما بالا، اگزاست توربین گاز و منبع حرارت دما پایین سوخت LNG است.



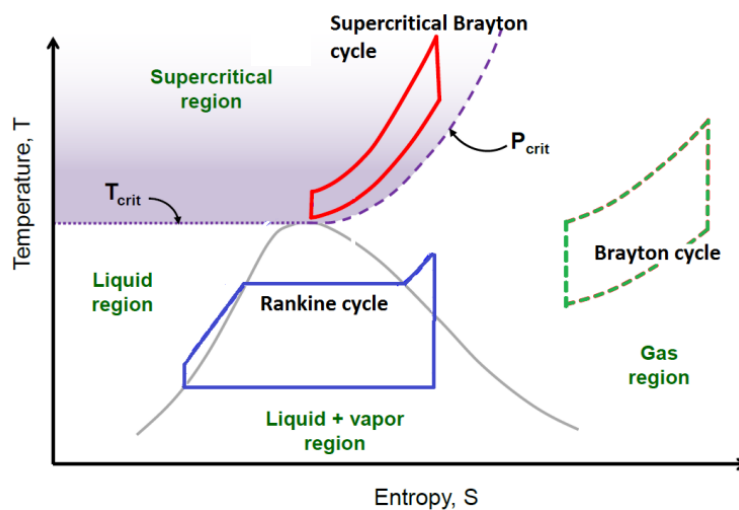
شکل ۴-۲- پیکربندی سیکل آبشاری (رانکین -برایتون) ترکیبی با منبع حرارتی اگزاست توربین

جریان محصولات احتراق خروجی از توربین گاز با دمای بالا ( $T_{4g}$ ) به عنوان منبع حرارتی دما بالای سیکل و جریان سرد LNG به عنوان منبع دمای پایین سیکل است. از گرمای محصولات احتراق خروجی از توربین گاز ( $T_{4g}$ ) در دو مرحله استفاده میشود. در مرحله نخست این گرما در بخش بویلر به سیکل فوق بحرانی داده میشود سپس جهت بازیافت گرمای بیشتر، جهت پیش گرمایش سیکل رانکین (سیکل فشار پایین) استفاده میگردد. در نهایت محصولات احتراق با دمای  $T_{6g}$  به اتمسفر تخلیه میگردد. مطابق ۰ سیکل ۱ یک سیکل از نوع برایتون است زیرا سیال عامل (گازکربنیک) در تمامی مراحل مختلف سیکل بصورت فوق بحرانی است درحالیکه سیکل دوم فشار کاری کمتری نسبت به سیکل ۱ دارد و از نوع رانکین است زیرا به جای کمپرسور از پمپ استفاده شده است و سیال عامل (گاز کربنیک) در



بخشی هایی از چرخه (به عنوان مثال در فرآیند  $2t-1t$ ) بصورت مایع در خواهد آمد. لازم بذکر است در سیکل کسکید بالا کندانسور سیکل ۱ نقش بویلر سیکل ۲ را بازی میکند. در واقع حرارت گرفته شده از سیال عامل سیکل ۱، منبع تامین حرارت (بویلر) سیکل ۲ محسوب میشود.

در شکل زیر دیاگرام ترمودینامیکی سیکل ۱ و سیکل ۲ رسم شده است مطابق این نمودار سیکل ۱ از نوع براتون، فشار بالا و فوق بحرانی محسوب میشود سیکل شماره ۲ از نوع رانکین، فشار پایین است به کمک ترکیب این دو سیکل و لحاظ نمودن سیکل آبخاری میتوان گرمای اگزااست توربین را به درستی بازیافت نمود



شکل ۴-۳- نمودار تدمای بر حسب آنترپی برای چرخه برایتون

### ۴-۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم مربوط به سیکل ۱ و سیکل ۲ در ادامه ارایه شده است. سیکل ۱ یک سیکل برایتون و سیکل ۲ یک سیکل رانکین است. معادلات بالانس جرم و انرژی به شرح زیر است

#### ۴-۳-۱- سیکل اول

سیکل برایتون از یک توربین و یک کمپرسور و دو مبدل تشکیل شده است. بخشی از توان تولیدی توربین، توسط کمپرسور مصرف میشود. مقدار کار تولیدی توربین از رابطه زیر محاسبه میشود.

$$P_{s,turb} = q_{m,s} \eta_{s,turb} (h_{3s} - h_{4s,isen}) \quad (1-4)$$

توان مصرفی کمپرسور سیکل ۱،  $P_{s,comp}$  به شکل زیر تعیین می شود:

$$P_{s,comp} = q_{m,s}(h_{2s,isen} - h_{1s})/\eta_{s,comp} \quad (2-4)$$

در سیکل ۱، توربین، کمپرسور و ژنراتور دارای پیکره‌بندی هم‌محور هستند. بنابراین، انرژی خالص به شکل زیر محاسبه می‌گردد  $\eta_e$ ، بازده ژنراتور میباشد.

$$P_s = (P_{s,turb} - P_{s,comp})\eta_e \quad (3-4)$$

## ۴-۳-۲- سیکل دوم

سیکل دوم یک سیکل رانکین است. اجزای این سیکل شامل توربین پمپ کندانسور و بویلر است کار تولیدی توربین و کار مصرفی پمپ از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_{t,pump} = q_{m,t}(h_{2t,isen} - h_{1t})/\eta_{s,pump} \quad (4-4)$$

کار توربین سیکل ۲،  $P_{t,turb}$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_{t,turb} = q_{m,t}\eta_{t,turb}(h_{4t} - h_{5t,isen})\eta_e \quad (5-4)$$

توان خالص سیکل ۲ از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_t = (P_{t,turb} - P_{t,pump}) \quad (6-4)$$

دبی LNG از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (نقاط 0t و 0l نقاط پینچ میباشند)

$$q_{m,l} = q_{m,t}(h_{0,t} - h_{1,t})/(h_{0l} - h_{2l}) \quad (7-4)$$

## ۴-۳-۳- فرضیات مدل‌سازی

- در مدل‌سازی این پژوهش فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.
- ترکیب محصولات احتراق بصورت آب نیتروژن دی اکسید کربن و آرگون در نظر گرفته شد
- سیستم در حالت دائم در نظر گرفته شد
- سوخت LNG متان مایع در دمای ۱۷۰- است
- اتلاف حرارت در مبدل ناچیز فرض میشود
- افت فشار در خطوط و تجهیزات صرف‌نظر شد

### ۴-۳-۴- ترکیب آبخاری سیکل اول و دوم

سیکل اول و دوم سیکل آبخاری را به وجود می آورند تا انرژی حرارتی محصولات احتراق توربین گازی را بازیافت نموده و موجب تولید توان گردد.

$$P_{cas} = P_s + P_t \quad (۸-۴)$$

انرژی خالص سیکل ترکیبی آبخاری دی اکسید کربن از قرار زیر است،

$$P_{cc} = P_{gt} + P_{cas} \quad (۹-۴)$$

بازده حرارتی سیکل ترکیبی آبخاری دی اکسید کربن به وسیله ی رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\eta_{cc} = \frac{P_{cc}}{q_{m,f} \eta_b LHV} \quad (۱۰-۴)$$

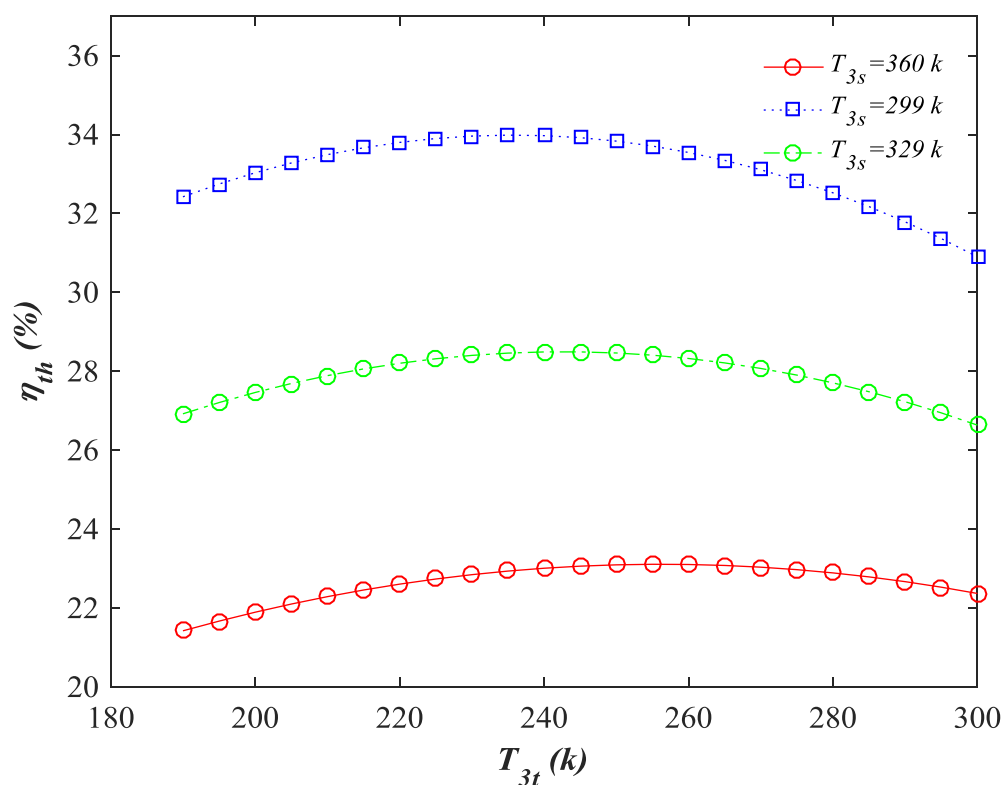
### ۴-۴-۱-اطلاعات و داده های ورودی

بازده آیزنتروپیک توربین های تولید توان برای سیکل ۱ و ۲ بصورت متعارف و برابر با ۸۵ درصد فرض شد فشار ورودی توربین برای هردو سیکل برابر با ۲۰۰ بار انتخاب گردید. محدودیت های موجود از جمله محدودیت در تکنولوژی و هزینه و ایمنی سبب میشود تا فشارهای بالاتر از ۲۰۰ بار انتخاب نگردد راندمان حرارتی قانون اول ترمودینامیک برای ۳ مبدل های حرارتی ۸۸ درصد فرض شدم منظور از راندمان حرارتی کارایی یا EFFECTIVENESS مبدل میباشد.

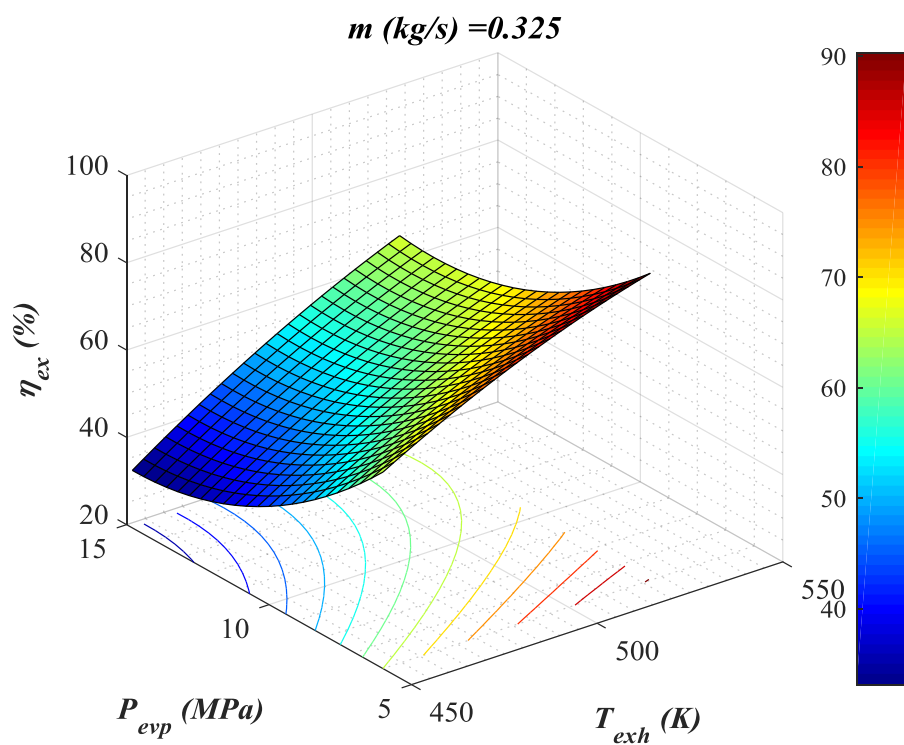
گرمای بازیافت شده از محصولات احتراق گازی نبایست بیش از اندازه باشد زیرا کاهش دمای گاز خروجی نهایی سبب افت دما و رسیدن دمای گاز به نقطه شبنم و ترکیب گازهای CO2 و SO2 با قطرات آب و تشکیل اسید H2CO3 و H2SO3 و خوردگی مبدل میگردد. دمای LNG به ترتیب برابر با ۱۶۹- درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. راندمان پمپ ۷۰ درصد در نظر گرفته شد و دمای پینچ نیز ۱۰ درجه فرض گردید.

## ۴-۵-نتایج

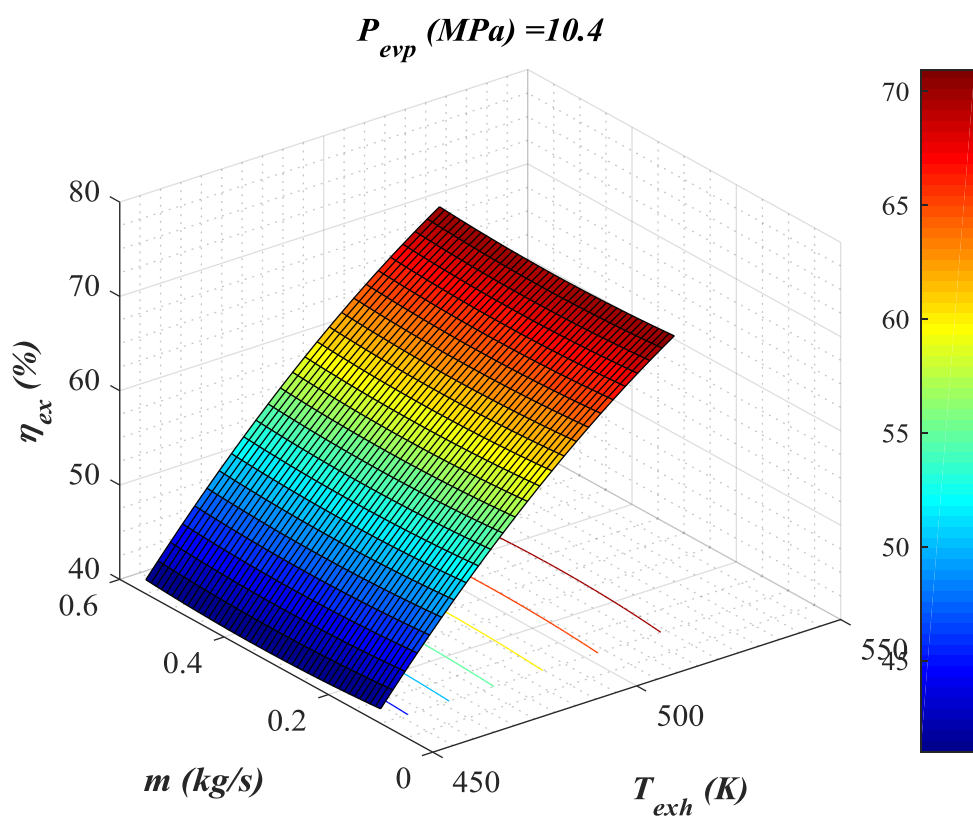
شکل ۴-۴ نمودار تغییرات راندمان حرارتی را با توجه به تغییرات دمای  $T_{3t}$  و  $T_{3s}$  نشان می‌دهد. با افزایش در مقدار  $T_{3t}$  زمانیکه دمای تبخیر  $T_{3s}$  ثابت است، راندمان حرارتی تقریباً ثابت می‌ماند و افزایش و کاهش بیشتر از دو درصد نخواهد داشت. خط قرمز از اتصال نقاط ماکزیمم نمودارها به یکدیگر بدست می‌آید. در دمای  $T_{3t}$  ثابت با افزایش دمای تبخیر  $T_{3s}$  مقدار راندمان افت میکند.



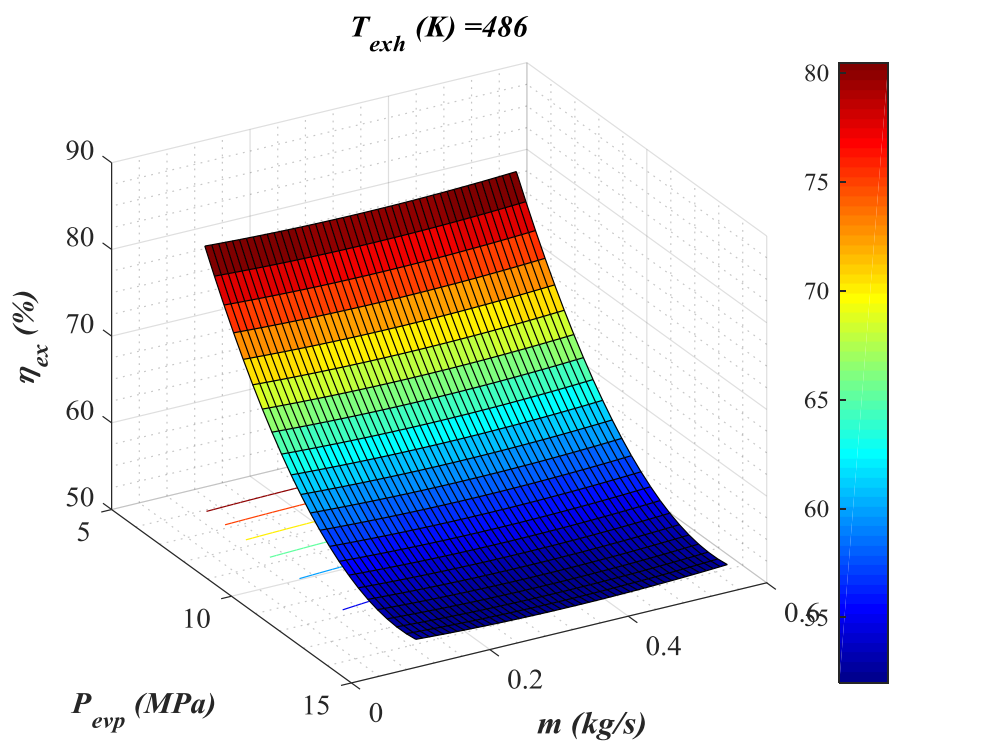
شکل ۴-۴- بازده حرارتی قانون اول بر حسب دمای  $T_{3t}$  و  $T_{3s}$



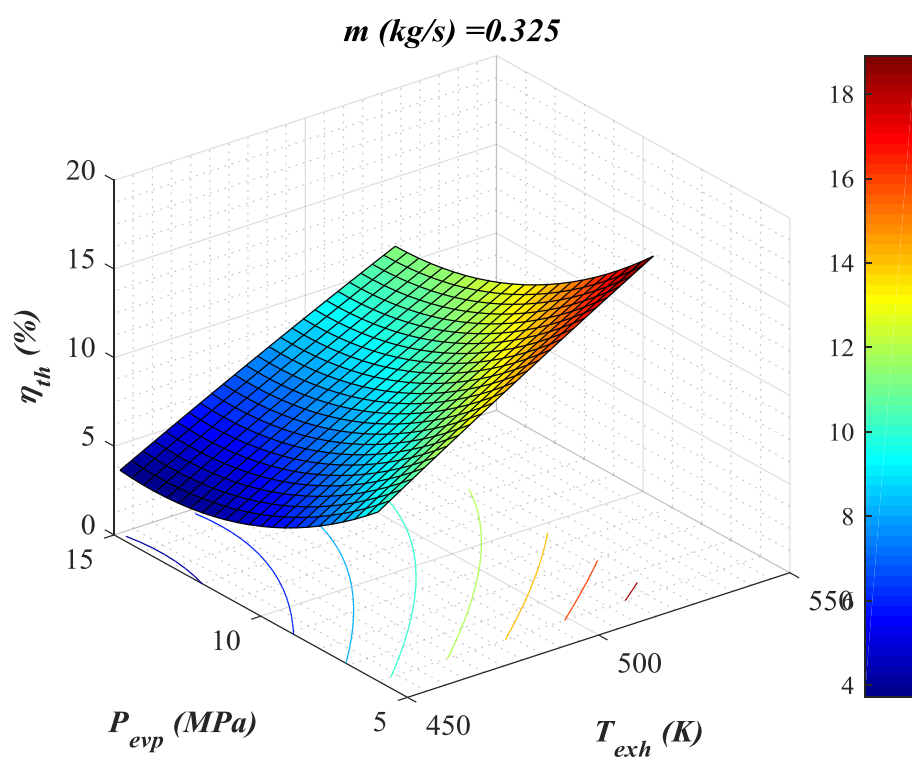
شکل ۴-۵- نمودار راندمان انرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور در دبی ثابت



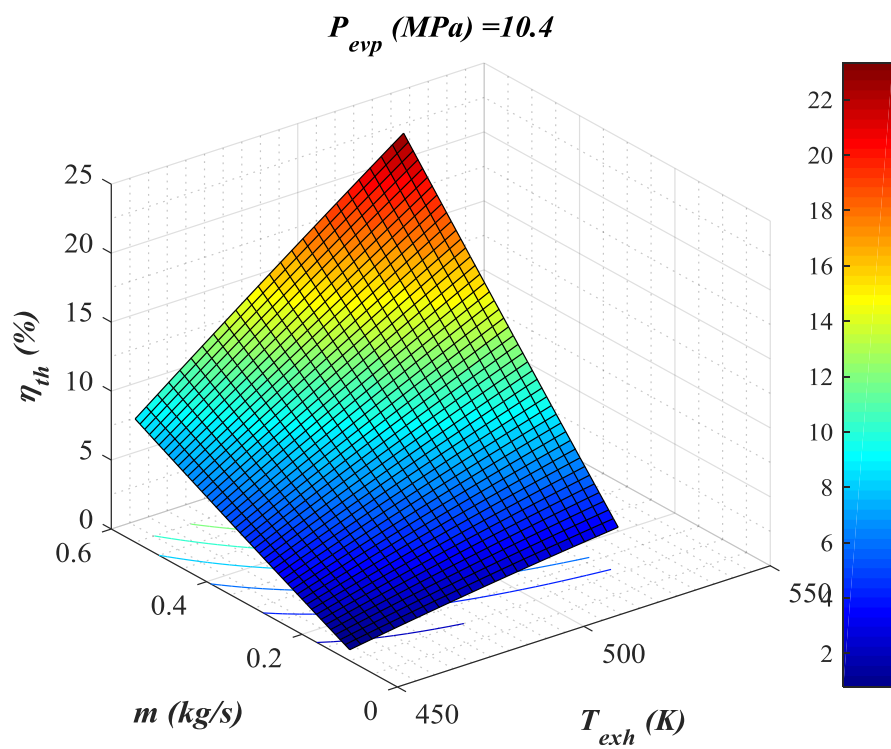
شکل ۴-۶- نمودار راندمان انرژی بر حسب دما اگزاست و دبی جرمی در فشار اواپراتور ثابت



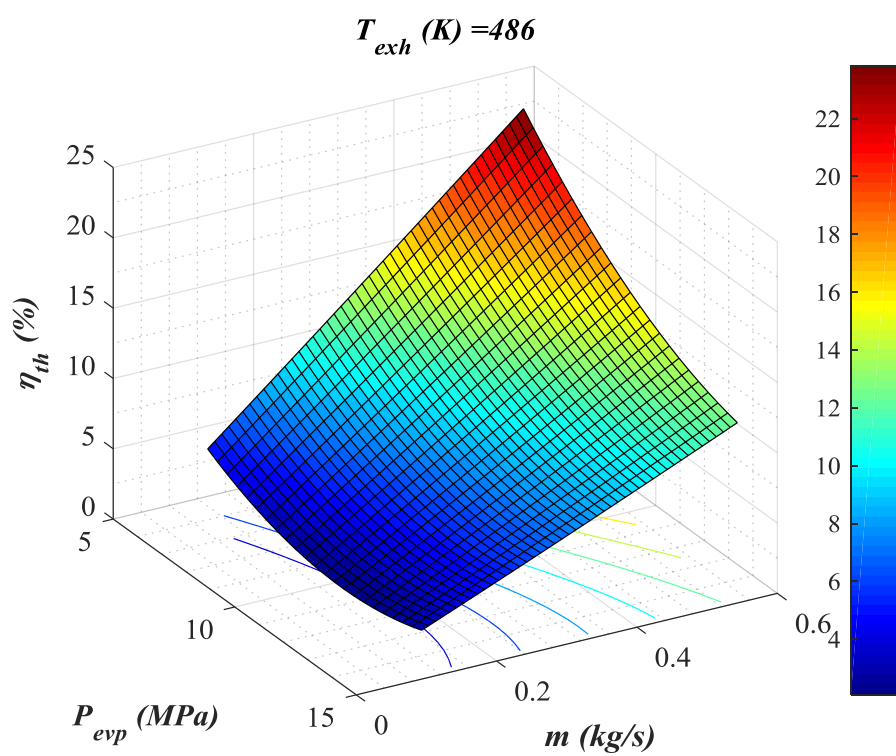
شکل ۴-۷- نمودار راندمان آگزرژی بر حسب دبی جرمی و فشار اواپراتور در دما اگزاست ثابت



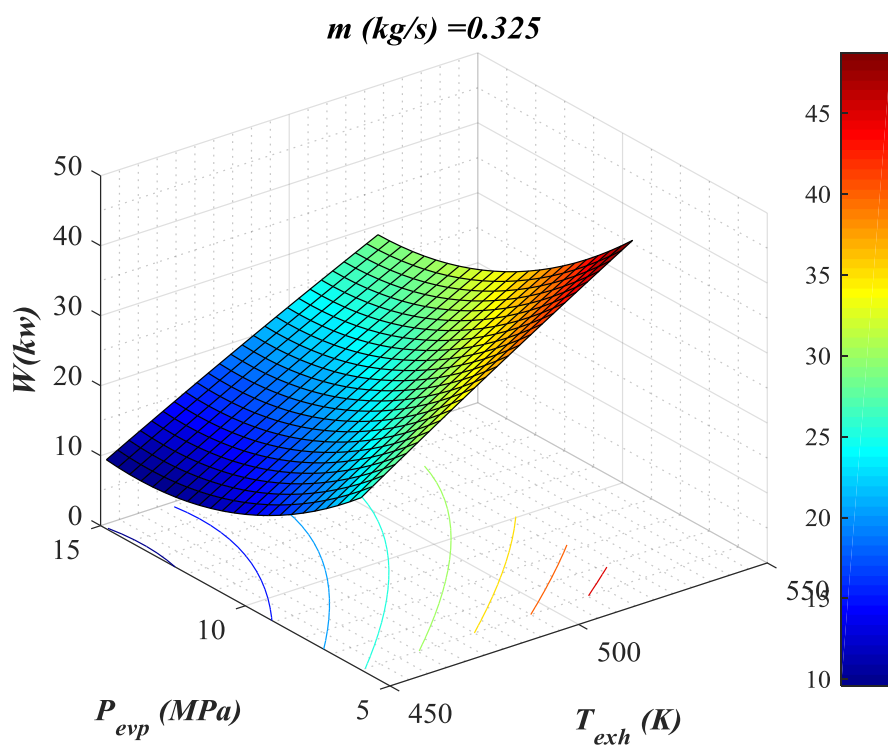
شکل ۴-۸- نمودار راندمان حرارتی قانون اول بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور در دبی جرمی ثابت



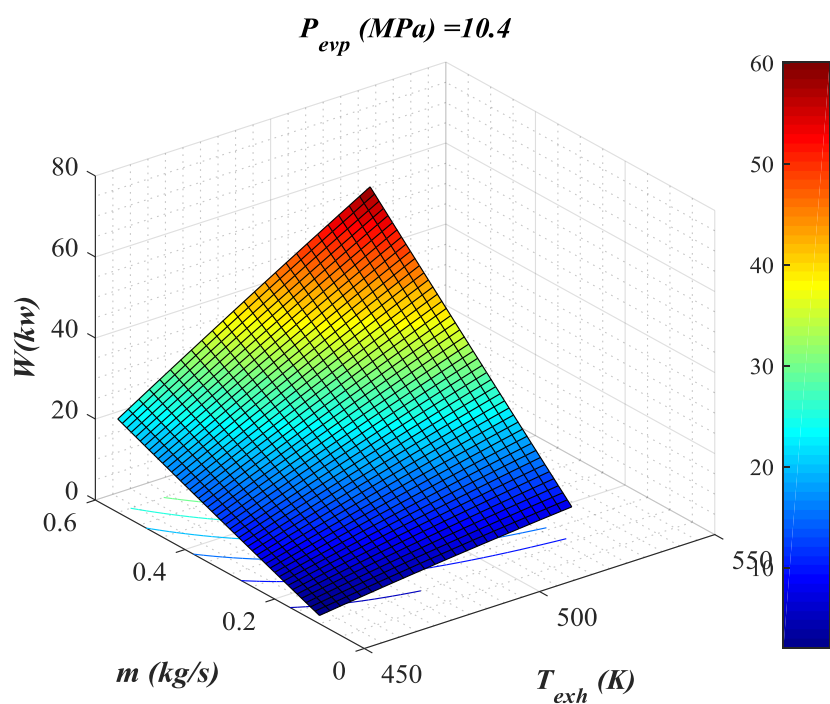
شکل ۴-۹- نمودار راندمان آگرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور



شکل ۴-۱۰- نمودار راندمان آگرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور

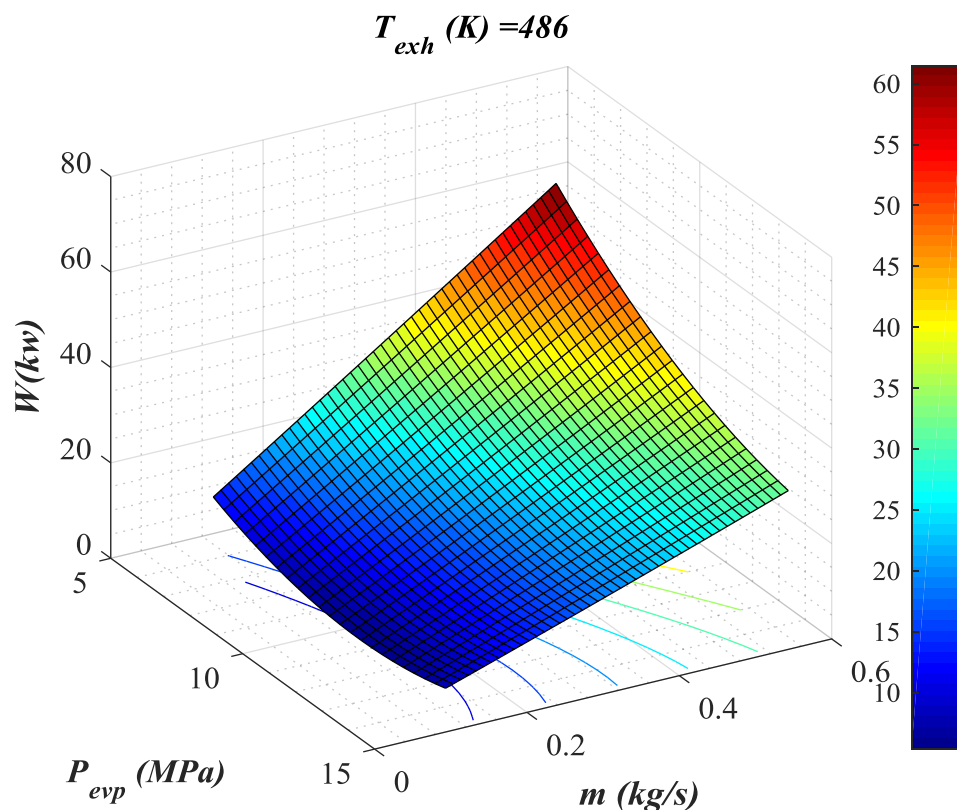


شکل ۴-۱۱- نمودار راندمان آگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور



شکل ۴-۱۲- نمودار راندمان آگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور

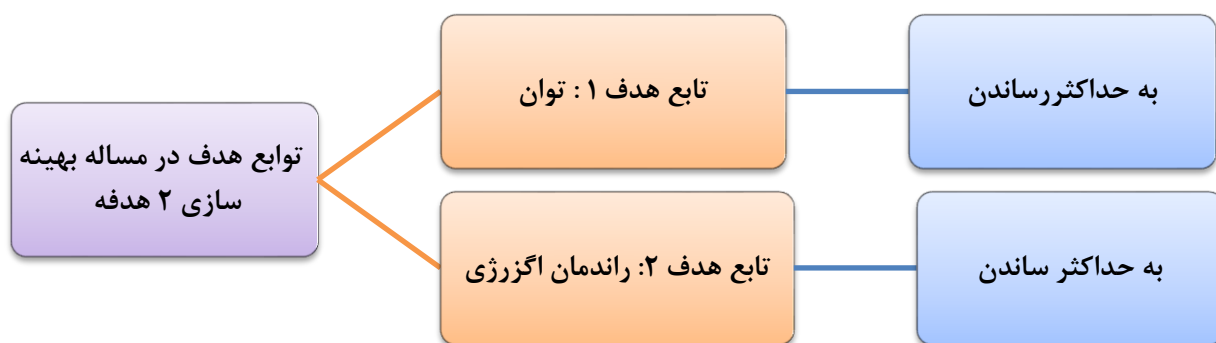




شکل ۴-۱۳- نمودار راندمان اگزرژی بر حسب دما اگزاست و فشار اواپراتور

## ۴-۶- بهینه سازی دو هدفه

بعد از ارائه مدل ریاضی، جهت پیش بینی توان خروجی و راندمان اگزرژی می‌توان به کمک الگوریتم ژنتیک به بهینه سازی این دو متغیر خروجی پرداخت. در این بخش به کمک الگوریتم ژنتیک و مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبلی، دو تابع هدف اگزرژی و توان بهینه خواهد شد. برای پیاده سازی بهینه سازی، یک برنامه به زبان متلب نوشته شد. این دو مدل هزاران بار توسط الگوریتم ژنتیک فراخوانده می‌شود. سپس، به جستجوی راه حل‌های بهینه در بین راه حل‌ها می‌پردازد، تا متغیرهای عملیاتی بهینه را بیابد. مطابق شکل زیر، بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک، از طریق بیشینه سازی توان و راندمان اگزرژی انجام می‌گیرد.



شکل ۴-۱۴- توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه

متغیرهای مستقل و توابع هدف در مساله بهینه سازی در جدول زیر ارائه شده است.

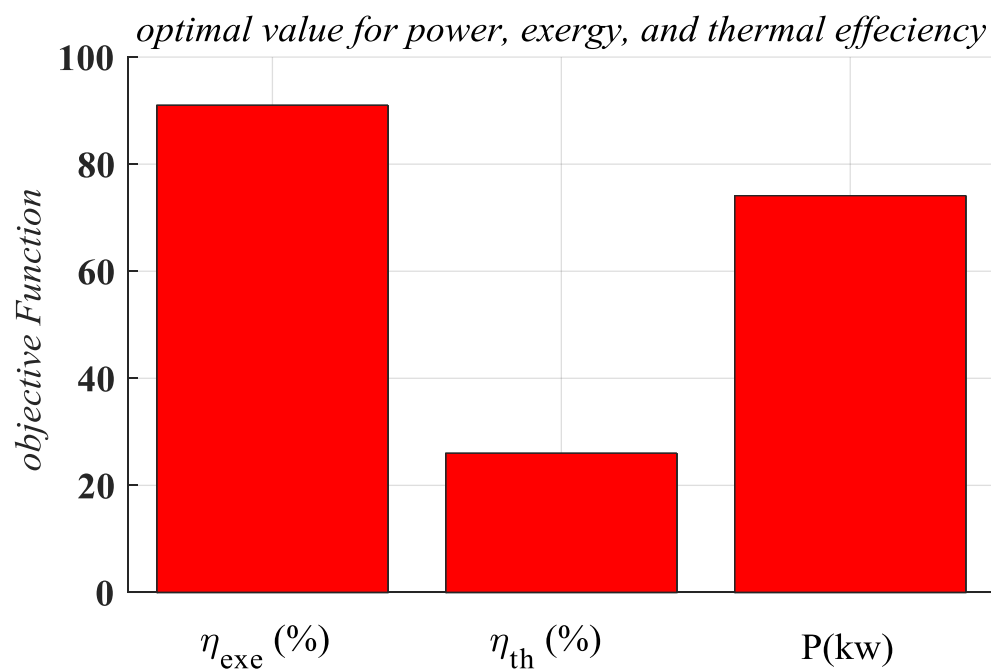
جدول ۴-۱- توابع هدف درصد حذف و شار عبوری و متغیرهای مستقل

توضیحات	نمایش	متغیر مستقل و وابسته	توابع هدف
توان کل	$P_T$	Total power	توابع هدف
راندمان انرژی	$\eta_{ex}$	Exergy efficiency (%)	توابع هدف
دمای تبخیر	$P_{evp}$	Evaporator pressure (bar)	متغیرهای مستقل
دمای اگزاست	$T_{exh}$	Exhaust Temperature (C )	متغیرهای مستقل
دبی سیکل	$m$	Mass flow rate (kg/s)	متغیرهای مستقل

مقادیر بهینه توابع به کمک الگوریتم ژنتیک محاسبه گردید. مقدار بیشینه برای توابع هدف توان و انرژی به ترتیب برابر با ۷۶ کیلووات و ۹۰٪ بدست آمد مقدار راندمان قانون اول در این حالت ۲۶ درصد بدست آمد. مقادیر بیشینه به ازای شرایط عملیاتی زیر بدست آمده است.

جدول ۴-۲- مقادیر بهینه سازی دو هدفه

Decision variables	Optimum value	
Evaporator pressure (bar)	$T_{evp}$	5 barg
Exhaust Temperature (C )	$T_{exh}$	550 C
Mass flow rate (kg/s)	$m$	0.6 kg/s



شکل ۴-۱۵- توابع هدف مساله بهینه سازی دو هدفه

نتایج بهینه سازی افزایش ۳ درصدی در بازده حرارتی را نشان می‌دهند سیکل انتخاب شده توانایی بازیافت حرارت را داشته و میتواند ۷۶ کیلووات با راندمان ۲۷ درصد تولید کند راندمان اگزرژی در این حالت به ۹۱ درصد میرسد.

## **فصل پنجم**

### **جمع بندی**

## ۵-۱- جمع بندی

- در این پژوهش در گام اول مدلسازی حالت پایه سیکل آبشاری فشار بالا و فشار پایین تحت شرایط ترمودینامیکی خاص صورت میگیرد در وهله دوم مساله بهینه سازی مطرح میگردد و در وهله سوم مطابق نمودار شکل زیر آنالیز حساسیت برای متغیرهای مستقل انجام میگردد.

- مقادیر بهینه توابع بهینه به کمک الگوریتم ژنتیک محاسبه گردید. مقدار بیشینه برای توابع هدف توان و انرژی به ترتیب برابر با ۷۶ کیلووات و ۹۰/۶٪ بدست آمد مقدار راندمان قانون اول در این حالت ۲۶ درصد بدست آمد. مقادیر بیشینه به ازای شرایط عملیاتی زیر بدست آمده است.

- نتایج بهینه سازی افزایش ۳ درصدی در بازده حرارتی را نشان می دهند سیکل انتخاب شده توانایی بازیافت حرارت را داشته و میتواند ۷۶ کیلووات با راندمان ۲۷ درصد تولید کند راندمان انرژی در این حالت به ۹۱ درصد میرسد.

- با افزایش در مقدار T3t زمانیکه دمای تبخیر ثابت است، راندمان حرارتی تقریباً ثابت می ماند و افزایش و کاهش بیشتر از دو درصد نخواهد داشت. خط قرمز از اتصال نقاط ماکزیم نمودارها به یکدیگر بدست می آید. در دمای T3t ثابت با افزایش دمای تبخیر T3s مقدار راندمان افت میکند.

## ۵-۲- پیشنهادات آینده

- استفاده از انرژی تجدید پذیر زمین گرمایی جهت تولید توان در سیکل ORC
- استفاده از انرژی تجدید خورشیدی جهت تولید توان در سیکل ORC
- استفاده از گرمایش مجدد سیال عامل و بررسی تاثیر آن بر بازدهی سیکل
- بهینه سازی راندمان - هزینه - توان به کمک الگوریتم کوچ پرندگان
- بهینه سازی یک سیکل ORC به کمک استفاده از گرمای بازیاب یک موتور دیزل
- استفاده از نانو سیال در سیکل ORC و بررسی اثر افزایش بازده سیکل

## مراجع

- [1] Khaljani, M., R. Khoshbakhti Saray, and K. Bahlouli. "Thermodynamic and thermoeconomic optimization of an integrated gas turbine and organic Rankine cycle." *Energy* 93 (2015): 2136-2145.
- [2] Tocci, Lorenzo, et al. "Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC): A Techno-Economic Review." *Energies* 10.4 (2017): 413.
- [3] <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/12/8294/htm>
- [4] Chacartegui R, Sánchez D, Muñoz JM, Sánchez T. Alternative ORC bottoming cycles FOR combined cycle power plants. *Appl Energy* 2009;86:2162–70.
- [5] Cao Y, Dai YP. Comparative analysis on off-design performance of a gas turbine and ORC combined cycle under different operation approaches. *Energy Convers Manage* 2017;135:84–100.
- [6] Wang X, Dai Y. Exergoeconomic analysis of utilizing the transcritical CO<sub>2</sub> cycle and the ORC for a recompression supercritical CO<sub>2</sub> cycle waste heat recovery: A comparative study. *Appl Energy* 2016;170:193–207.
- [7] Wang J, Wang J, Dai Y, Zhao P. Thermodynamic analysis and optimization of a transcritical CO<sub>2</sub> geothermal power generation system based on the cold energy utilization of LNG. *Appl Therm Eng* 2014;70:531–40.
- [8] Roy, J.P. Mishra, M.K. Misra, A. "Performance analysis of organic rankine cycle with superheating under different heat source condition" *Applied Energy*, Vol. 88, pp.29953004, 2013.
- [9] Roy, J.P. Mirsa, A. "Parametric optimization and performance analysis of a regenerative organic rankine cycle using R123 for waste heat recovery" *Energy*, Vol.39, pp. 227235, 2012.
- [10] Tchanche, B.F. Papadakis, G. et al. "A fluid selection for a low temperature solar organic rankine cycle" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2468-2476, 2009.
- [11] Quoiline, S. Declaye, S. et al "Thermoeconomic optimization of Waste heat recovery organic rankine cycle" *Applied thermal engineering*, Vol. 31, pp. 2885-2893, 2013.
- [12] Maizza V. and Maiza A. 1996. Working fluids in non-steady flow for waste energy recovery system. *Applied Thermal Engineering*, 16 (7): 579-590.
- [13] Saleh, Bahaa, et al. "Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles." *Energy* 32.7 (2007): 1210-1221.
- [14] Hung, T.C., 2001. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. *Energy Conversion and management*, 42(5), pp.539-553.

- [15] Hung, T.C., Shai, T.Y. and Wang, S.K., 1997. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22(7), pp.661-667.
- [16] Liu, B.T., Chien, K.H. and Wang, C.C., 2004. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. *Energy*, 29(8), pp.1207-1217.
- [17] Srinivasan, K.K., Mago, P.J. and Krishnan, S.R., 2010. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. *Energy*, 35(6), pp.2387-2399.
- [18] Desai, N.B. and Bandyopadhyay, S., 2009. Process integration of organic Rankine cycle. *Energy*, 34(10), pp.1674-1686.
- [19] Mohanty, B. and Paloso, G., 1992. Economic power generation from low-temperature geothermal resources using organic Rankine cycle combined with vapour absorption chiller. *Heat Recovery Systems and CHP*, 12(2), pp.143-158.
- [20] Jing, L., Gang, P. and Jie, J., 2010. Optimization of low temperature solar thermal electric generation with Organic Rankine Cycle in different areas. *Applied Energy*, 87(11), pp.3355-3365.
- [21] Hettiarachi, H. Golubovic, M. Worek, W.M. "Optimum design criteria for an organic rankine cycle using low and medium temperature geothermal heat source" *Energy*, Vol. 32, pp. 16981707, 2007.
- [22] Nafey, A.S. Shraf, M.A. "Combine solar organic rankine cycle With reverse osmosis desalination process, energy, energy and cost evaluation" *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 25712580, 2010.
- [23] Hebrl, F. Buggemann, D. "Exergy based fluid selection for a geothermal organic rankine cycle for combine heat and power generation" *Applied Thermal Engineering* Vol. 30, pp. 1326-1332, 2010.
- [24] Dai, Y.P. Wang, G. F. Gao, L. "Parametric optimization and comparative Study of organic rankine cycle for low grade waste heat recovery" *Energy Conversion and management*, Vol. 50, pp. 576582, 2009.
- [25] Aleksandra, B.G. Wladyslow, M. "Maximizing the working flow as a way of increasing power output of geothermal power plant" *Applied thermal engineering*, Vol. 27, pp. 20742079, 2007.
- [26] Gu, W. Weng, Y. et al. "theoretical and experimental investigation of an organic rankine cycle for West heat recovery system" *Proc Inst Mech Eng, Part A.Journal of power energy*, Vol. 223, pp. 523533, 2009.
- [27] Zhang, X.R. Yamaguchi, H. et al. "Theoretical analysis of a thermodynamic cycle for power and heat production using supercritical carbon dioxide" *Energy*, Vol. 32, pp. 591599, 2007.



- [28] Liu, B. Chien, K. "Effect of Working Fluid on organic rankine cycle for waste heat Recovery" *Energy*, Vol. 29, pp. 1207-1217, 2004.
- [29] Hung, T.C. "Waste heat recovery of organic rankine cycle using dry fluid" *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 539-553, 2001.
- [30] Hung, T.C. Wang, S.K. et al. "A study of organic working fluid on system efficiency of an ORC using low grade energy source" *Energy*, Vol. 35, pp. 1403-1411, 2010.
- [31] Aljundi, I.H. "Effect of dry hydrocarbon and critical point temperature on the efficiency of organic rankine cycle" *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 1196-1202, 2011.
- [32] Chen, Y. Lundqvist, P. et al. "A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compare with an organic rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 2142-2147, 2006.
- [33] Rashidi, M.M. Galanis, M. et al. "Parametric analysis and optimization of regenerative clausius and Organic rankine cycle with two feedwater heaters using artificial bees colony and artificial natural network" *Energy*, Vol. 36, pp. 5728-5740, 2011.
- [34] Hi, C. Liu, C. et al. "The optimal evaporation temperature and working fluid for subcritical organic rankine cycle" *Energy*, Vol. 38, pp. 1361-1373, 2012.
- [35] Wang H. Peterson, R. Herron, T. "Design study of configuration on system COP for a combine organic rankine cycle and vapor compression cycle" *Energy*, Vol. 36, pp. 4809-4820, 2011.
- [36] Li, X. Zhao, C. Hu, X. "Thermodynamic analyses of an organic rankine cycle with ejector" *Energy*, Vol. 42, pp. 3423-3429, 2012.
- [37] Al-sulaiman, F. Dincer, I. Hamdullahpour, F. "Thermodynamic optimization of three trigeneration system using organic rankine cycle" *Energy Conversion and Management*, Vol. 69, pp. 1992-2008, 2013.
- [38] Wang, M. Wang, J. et al, "Thermodynamic analysis and optimization of solar-driven regenerative organic rankine cycle based on flat plate solar collector" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, pp. 816-825, 2013.
- [39] Al-emam, R. Dincer, I. "Exergy and exergoeconomic analysis and optimization of geothermal organic rankine cycle" *Applied thermal engineering*, Vol. 59, pp. 435-444, 2013.
- [40] Michalewicz, Z., 1992. *Genetic Algorithms + Data structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin, 250 p.
- [41] Mitchell, M., 1998. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Published by: A Bradford Book, 221 p.
- [42] Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press (Ann Arbor).

[43] Reformat, M., 1997. Application of Genetic Algorithms in Control Design for Advanced Static VAR Compensator at ac/dc Interconnection. University of Manitoba Press, 129 p.

[44] Milidui, R.L., Duarte, J.C., Santos, C.N., 2007. Evolutionary TBL template generation, J. Braz. Comp. Soc., Vol. 13, No. 4, pp. 39-50.

## **Abstract**

### **Modeling and optimization of turbine efficiency in combined cycle power plants**

In this research, in the first step, the modeling of the basic state of the high pressure and low pressure cascade cycle is performed under certain thermodynamic conditions. In the second step, the optimization problem is presented and in the third step, according to the diagram shown below, the sensitivity analysis for the independent variables is performed.

The optimal optimal functions were calculated using genetic algorithm. The maximum value for power and exergy functions was 76kW and 90.6%, respectively. The first law efficiency was 26% in this case. Unencumbered values are obtained for the operating conditions below. Optimization results show a 3% increase in thermal efficiency. The selected cycle has the ability to recover heat and can produce 76kW with a yield of 27%. Exergy efficiency in this case is 91%. With increasing  $T_{3t}$  when the evaporation temperature is constant, thermal efficiency remains almost constant and will not increase or fall by more than two percent. The red line is obtained by connecting the maximum points of the graphs to each other. At constant temperature  $T_{3t}$ , the efficiency decreases with increasing evaporation temperature  $T_{3s}$ .

**Keywords:** ORC cycle - optimization - exergy dynamics - second law of thermodynamics



**Central Tehran Branch**  
**Faculty of Engineering - Department of Chemical Engineering**

**“M.Sc. “Thesis**  
**On Mechanical Engineering Energy Conversion**

**Subject:**  
**Modeling and optimization of turbine efficiency in combined cycle power plants**

**Supervisors:**  
**Dr. Hossein Tamim**  
**Dr. Yousef Yasi**

**By:**  
**Behzad Maleki**

**Autumn 2018**