

بهینه‌سازی سیکل نیروگاه بخار بازتوانی شده با استفاده از تحلیل ترموآکونومیک

کریم مقصودی مهربانی^۱، صادق نیک‌بخت نصرآباد^۲، عبدالله مهرپناهی^{۳*} و سمیه سادات فانی یزدی^۴

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، k.maghsoodi@srttu.edu

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، s.nikbakht@srttu.edu

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، mehrpanahi@srttu.edu

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران،

lady_fani2006@yahoo.com

چکیده: استفاده از حرارت گازهای خروجی از توربین گاز جهت گرمایش آب تغذیه یک سیکل بخار، بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه نامیده می‌شود. ایجاد تغییرات لازم در ساختار یک سیستم حرارتی به منظور به حداقل رساندن هزینه آن، دربرگیرنده یافتن موازنه‌ای بهینه میان نرخ هزینه مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و آگزرژی از دست‌رفته سیستم است. در پژوهش حاضر، ابتدا سیکل بازتوانی شده نیروگاه بخار شهید رجایی به روش گرمایش آب تغذیه، مدل‌سازی شده و در مرحله بعد، با در نظر گرفتن متغیرهای ترموآکونومیک اجزای نیروگاه به‌عنوان توابع هدف، تغییرات بهینه شده است. سپس، حساسیت تابع هدف در اثر تغییرات دبی زیرکش توربین‌های بخار موجود، مورد بررسی قرار گرفته و بهینه‌ترین مقدار دبی با روش الگوریتم ژنتیک مشخص شده است. در نتیجه این بهینه‌سازی، بازده ترمودینامیکی و آگزرژی نیروگاه به ترتیب به مقادیر ۴۲/۲ و ۴۰/۱۷ درصد ارتقا یافته و بهره‌وری هزینه برای اجزای با هزینه آگزرژی از دست‌رفته بالا، ۱ تا ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، زمان بازگشت سرمایه اولیه در این روش، مقدار مطلوب ۲۵ ماه به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ترموآکونومیک، بازتوانی، نیروگاه بخار، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

۱. مقدمه

ترمواکونومیک^۱ شاخه‌ای از علوم حرارتی است که طبق آن، آگزرژی (انرژی در دسترس) تنها اصل منطقی جهت دستیابی به هزینه‌های مالی در تبادل یک سیستم با محیط پیرامون و با منابع بازگشت‌ناپذیر داخل آن است. به دلیل رویکرد ترمواکونومیک براساس مفهوم آگزرژی، اصطلاحات ترمواکونومیک و آگزرژی اکونومیک^۲ در یک مفهوم واحد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

بررسی باز توانی نیروگاه‌های بخار توسط اشخاص و شرکت‌های مختلفی انجام شده است؛ برای مثال، یک محقق دانمارکی به نام الکرافت، تحقیقاتی در زمینه باز توانی گرمکن آب تغذیه انجام داد تا به ترکیب مناسبی دست یابد [۲]. شرکت آلستوم^۳ در سنگاپور، طرح تبدیل سه واحد ۱۲۰ مگاواتی یک نیروگاه بخار با عمر ۲۵ سال، به سه واحد سیکل ترکیبی هر یک با ظرفیت ۳۶۰ مگاوات را اجرا کرد که موجب افزایش راندمان از ۳۸ درصد به ۵۶ درصد شد [۳]. در سال ۱۹۹۲، براندر و چس به بررسی رفتار، مزایا و محدودیت‌های انواع سیکل‌های باز توانی پرداختند. نتایج حاصل از اعمال محدودیت‌ها نشان می‌دهد که تعدادی از نیروگاه‌های تحت بررسی، به لحاظ اقتصادی قابلیت باز توانی ندارند [۴]. در سال ۱۹۹۴، ملی و همکاران به مطالعه نیروگاه‌های باتوان نامی کمتر از ۱۸۰ مگاوات ایتالیا پرداختند. در این پژوهش، با بررسی سه پارامتر هزینه، بازده و اتلافات حرارت، آرایشی مناسب از لحاظ فنی-اقتصادی را برای هر گروه از نیروگاه‌ها به دست آوردند [۵]. در سال ۱۹۹۷، هین و کالتونز به مقایسه سه سیکل نیروگاهی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که باز توانی با توربین گاز اکسیداسیون جزئی با راندمان آگزرژی ۴۳/۱٪ بیشترین راندمان را به خود اختصاص داده است [۶]. در سال ۲۰۰۶، فرانکل به بررسی اعمال روش استاندارد باز توانی بر یک نیروگاه ۳۰۰ مگاوات در روسیه پرداخت. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال این روش راندمان از ۳۸ درصد به ۵۶/۸ درصد افزایش می‌یابد [۷]. در سال ۲۰۱۰، براکو و سیری از یک مدل ریاضی، برای بهینه‌سازی بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره یک سیکل ترکیبی به کمک قانون اول و دوم استفاده کردند. در انتها فشار بخار بهینه در تمام نقاط نیروگاه برای توابع هدف مختلف به دست آمده است [۸]. در سال ۲۰۱۱، حسینعلی‌پور و مهرپناهی طی پژوهشی، باز توانی نیروگاه بخار شهید رجایی را به روش گرمایش آب تغذیه موازی و براساس هزینه برق تولیدی بهینه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که کمترین هزینه برق تولیدی زمانی اتفاق می‌افتد که دبی چهار زیرکش تغییر کرده و از توربین گاز ۳۵ مگاوات

استفاده شود [۹]. در سال ۲۰۱۱، مهرپناهی و همکاران به بررسی تأثیر روش‌های مختلف باز توانی بر هزینه برق تولیدی در نیروگاه‌های ایران پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که باز توانی نیروگاه نه تنها ظرفیت نیروگاه را به صورت قابل توجهی افزایش می‌دهد، بلکه هزینه تولید برق کمتری نسبت به دو حالت احداث نیروگاه سیکل ترکیبی یا نیروگاه گازی دارد [۱۰]. در سال ۲۰۱۲، وولوویسز و همکاران به بررسی باز توانی یک نیروگاه بخار ۸۰۰ مگاوات با روش گرمایش آب تغذیه پرداختند. نتایج باز توانی نیروگاه در بار نامی^۴، نشان‌دهنده افزایش یک درصدی راندمان و رسیدن به راندمان ۴۴/۵٪ است [۱۱].

به طور کلی، باز توانی را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: باز توانی کامل و باز توانی جزئی. باز توانی کامل جهت بهبود عملکرد نیروگاه‌های بخار قدیمی به کار برده می‌شود. این روش، متداول‌ترین و ساده‌ترین روش باز توانی نیروگاه است و بهترین گزینه برای به حداکثر رساندن راندمان با هزینه کم می‌باشد [۱۲ و ۱۳].

باز توانی جزئی برای بهبود عملکرد نیروگاه‌های مدرن به کار برده می‌شود. متداول‌ترین روش‌های باز توانی جزئی عبارت‌اند از [۱۴ و ۱۵]:

۱. باز توانی جزئی به روش گرمایش آب تغذیه؛ ۲. باز توانی جزئی به روش جعبه هوای داغ؛ ۳. باز توانی جزئی به روش بویلر کمکی.
- در میان روش‌های فوق، روش گرمایش آب تغذیه نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر و زمان اجرای عملیات باز توانی نیروگاه کمتر است و مستلزم خارج کردن نیروگاه مبدأ جهت تغییر ساختار نیست. با توجه به ساختار نیروگاه، گرمکن‌های آب تغذیه موجود اجازه این عمل را که یک یا چند توربین گاز از سیکل خارج شوند یا نیروگاه به حالت اول باز گردد، به سیستم می‌دهند [۱۶].

در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن نیروگاه بخار شهید رجایی قزوین به عنوان یک نیروگاه مناسب جهت انجام عملیات باز توانی با روش گرمایش آب تغذیه [۱۷] با استفاده از تحلیل ترمواکونومیک، مقادیر بهینه برای تغییرات دبی زیرکش توربین‌های موجود مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به فاکتور بهره‌وری هزینه، عملی بودن انجام این باز توانی و صرفه اقتصادی آن مطالعه شده است. اگرچه باز توانی با روش گرمایش آب تغذیه به عنوان یکی از روش‌های مؤثر و قابل قبول در انجام باز توانی جزئی در طی سال‌های اخیر، مورد توجه محققان داخلی قرار گرفته است [۱۴، ۱۸ و ۱۹]؛ اما به ندرت، تحقیقاتی درباره بررسی پارامترهای آگزرژی و اقتصادی در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی که در پله‌ای فراتر قرار دارد، صورت گرفته است. تحقیق‌های پیشین به بررسی‌های کلی از راندمان و هزینه احداث و تغییر ساختار سیکل بسنده کرده‌اند و اغلب

1. Thermoeconomics
2. Exergoeconomics
3. Alstom

۳. بازتوانی نیروگاه

عملیات بازتوانی با گرمایش موازی آب تغذیه در مبدل‌های حرارتی که حرارت مورد نیاز خود را از گازهای داغ توربین (های) گاز تأمین می‌کند، به منظور تعیین بهترین حالت موجود در تعیین مقادیر زیرکش توربین‌های بخار جهت ارتقای خصوصیات فنی سیکل بازتوانی شده، به کار گرفته می‌شود (شکل ۲). متغیرهای مستقل انتخاب شده در تحلیل حاضر، مقادیر دبی زیرکش توربین‌های بخار بوده که تابع هدف بر پایه تغییرات این مقادیر بهینه می‌شود. در صورت تعیین توان تولیدی نیروگاه به عنوان تابع هدف، از میان روش‌های ذکر شده برای بازتوانی یک نیروگاه، بازتوانی به روش گرمایش موازی آب تغذیه موازی، بهترین گزینه تغییر ساختار نیروگاه است. این روش با استفاده از گاز خروجی توربین گاز، توان و راندامان سیکل موجود را افزایش می‌دهد. در تحلیل سیکل در بار جزئی، طرح بازتوانی با تغییرات سه زیرکش نسبت به حالت چهار زیرکش و این حالت نسبت به حالت تغییرات در پنج زیرکش انعطاف‌پذیری کمتری دارد. در این تحقیق، از حالت میانه (تغییرات چهار زیرکش) استفاده شده است [۲۴].

۴. تحلیل ترموآکونومیک

در یک تحلیل ترموآکونومیک، برای محاسبه متغیرهای ترموآکونومیک مرتبط با هر جزء، بهینه‌سازی و تعیین نرخ هزینه مربوط به هر یک از مواد و جریان‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به طور کلی، یک تحلیل ترموآکونومیک دربرگیرنده موارد زیر است:

۱. تحلیل اقتصادی ۲. قیمت‌گذاری انرژی؛ ۳. محاسبات ترموآکونومیکی.

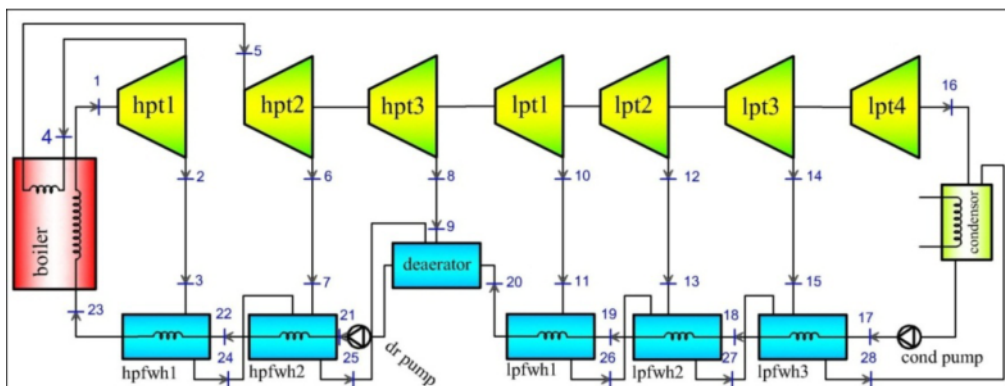
۱.۴. تحلیل انرژی

تحلیل انرژی یک سیستم موقعیت، اندازه و منابع بازگشت‌ناپذیری‌های ترمودینامیکی در آن سیستم حرارتی را مشخص می‌کند.

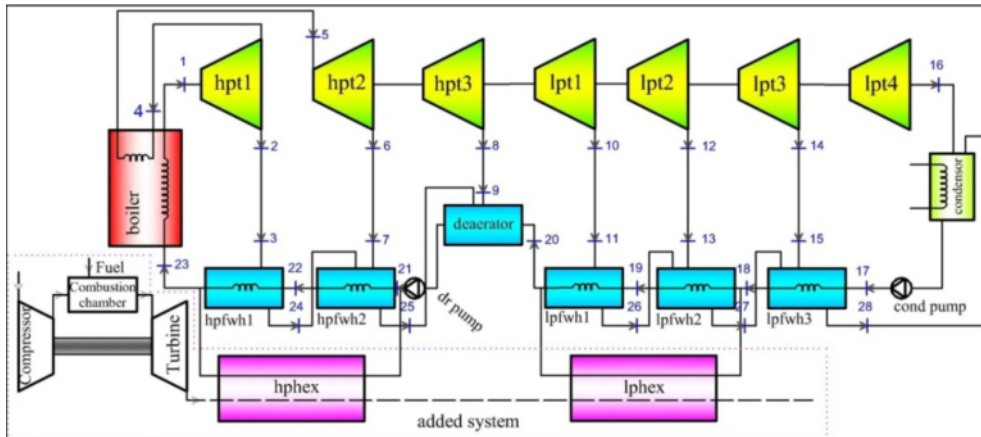
به مطالعه در خصوص روش‌های مختلف بازتوانی و محدود به تحلیل‌های ساده ترمودینامیکی، انرژی و به‌ندرت اقتصادی پرداخته‌اند. تحلیل ترموآکونومیک ارائه شده در این پژوهش، ترکیبی از تحلیل انرژی و اصول اقتصادی جهت ارائه به طراحان سیستم‌های نیروگاهی است. این تحلیل شامل اطلاعاتی است که در عملکرد یک سیستم بهینه فنی-اقتصادی بسیار مهم بوده و با یک تحلیل انرژی و یک ارزیابی اقتصادی به صورت جداگانه در دسترس نیست [۲۰]. اگرچه در مقالات پیشین اصولی برای ارزیابی ناکارآمدی‌های یک سیستم نیروگاهی به‌ندرت یافت می‌شود، در عمل، این ارزیابی بدون تعیین هزینه ناکارآمدی‌های نیروگاه که در پژوهش حاضر به تفصیل و برای هر جزء نیروگاه مورد بحث قرار گرفته است، بهبودی در اثر بخشی هزینه‌های نیروگاه نخواهد داشت. اطلاع از هزینه ناکارآمدی‌های نیروگاه بازتوانی شده، در بهبود عملکرد فنی-اقتصادی نیروگاه که همان کاهش هزینه محصول نهایی نیروگاه (برق) است، اهمیت فراوانی دارد.

۲. معرفی نیروگاه بخار شهید رجایی

مدل‌سازی ارائه شده در این پژوهش، بر مبنای داده‌های به‌دست آمده از نیروگاه بخار شهید رجایی در بار نامی تحلیل شده است [۲۱]. این نیروگاه شامل ۴ واحد بخار ۲۵۰ مگاواتی است. هر واحد بخار این نیروگاه دارای ۷ توربین بخار از نوع عکس‌عملی و عکس‌عملی ضربه‌ای است که ۴ عدد از این توربین‌ها با فشار ضعیف و ۳ عدد با فشار قوی در نظر گرفته شده‌اند. طراحی سیکل نیروگاه مذکور به صورت شکل (۱) و توسط شرکت میتسویشی ارائه شده است. داده‌های جدول (۱) مرجع [۲۲] معرف مشخصات ترمودینامیکی نقطه به نقطه این سیکل است. با در نظر گرفتن راندمان مکانیکی ۹۹ درصد برای توربین‌های بخار [۲۳]، در توان ۲۵۰ مگاوات، راندمان انرژی ۳۵/۱۶ درصدی برای این نیروگاه حاصل می‌شود.



شکل (۱): طرح‌واره نیروگاه بخار شهید رجایی



شکل (۲): طرح‌واره واحد بخار بازتوانی شده نیروگاه شهید رجایی به روش گرمایش آب تغذیه موازی

سوخت مصرفی نیروگاه بر حسب گاز طبیعی، از ترکیب دو معادله (۴) و (۵) برای محاسبه این مهم استفاده می‌شود:

$$\dot{Q}_{boiler} = \dot{m}_{f,b} \cdot LHV_f \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{boiler} = \frac{\dot{m}_{fw,in}(h_{out,boiler} - h_{in,boiler}) + \dot{m}_{reh}(h_{out,reh} - h_{in,reh})}{0.94} \quad (5)$$

رابطه زیر برای تعیین مقدار آگزرژی شیمیایی سوخت بر مبنای ارزش حرارتی پایین سوخت ارائه شده است [۲۶ و ۲۷]:

$$\xi = \frac{ex_f}{LHV_f} \quad (6)$$

در این رابطه، ξ ضریب تلفات آگزرژی ویژه است و به صورت رابطه‌ای تجربی برای سوخت‌های هیدروکربنی با فرمول شیمیایی C_xH_y ارائه شده است [۲۸ و ۲۹]:

$$\xi = 1.033 + 0.0169\left(\frac{y}{x}\right) - \frac{0.0698}{x} \quad (7)$$

با توجه به اینکه بیش از ۹۸/۵٪ از حجم گاز طبیعی را گاز متان تشکیل می‌دهد، برای تعیین مقدار این ضریب گاز متان در نظر گرفته شد [۳۰].

۱.۱.۴. معادلات تعادل آگزرژی

برای یک فرایند SSSF^۲ تعادل آگزرژی به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود:

$$\sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e + \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k + \dot{W}_{cv} = \dot{E}x_D \quad (8)$$

در این رابطه، \dot{Q}_k نرخ انتقال حرارت روی مرز در دمای T_k و در موقعیت k ، \dot{W}_{cv} نرخ کار انجام شده روی حجم کنترل، $\dot{E}x_i$ آگزرژی ورودی، $\dot{E}x_e$ آگزرژی خروجی و $\dot{E}x_D$ آگزرژی ازدست‌رفته حجم کنترل است.

این اطلاعات که به وسیله سایر ابزارها (مانند تحلیل انرژی) به دست نمی‌آید، جهت ارتقای راندمان و هزینه‌های سیستم مفید است. تحلیل آگزرژی راهکاری مناسب برای تعیین آگزرژی جریان، تلفات واقعی انرژی مانند ناکارآمدی ترمودینامیکی (تلفات و آگزرژی ازدست‌رفته) و راندمان آگزرژی در هر جزء سیستم است. آگزرژی هر سیستم رابطه مستقیمی با میزان انحراف آن سیستم با محیط دارد. به طور کلی، آگزرژی بر چهار شاخه استوار است: آگزرژی فیزیکی، آگزرژی شیمیایی، آگزرژی جنبشی و آگزرژی پتانسیل. به دلیل مقادیر کم آگزرژی جنبشی و پتانسیل، تحقیق حاضر از این دو بخش صرف‌نظر کرده و آگزرژی شیمیایی را به سوخت بویلر نیروگاه و آگزرژی فیزیکی را به هوا و گازهای احتراق نسبت داده است.

معادله آگزرژی فیزیکی هوا و گازهای احتراق به صورت زیر نوشته شده است [۲۵]:

$$\varepsilon_{ph} = Cp_{(T)} \left[T - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

که در این رابطه Cp ظرفیت گرمایی، T دما و اندیس صفر مربوط به شرایط مرده محیط می‌باشد.

آگزرژی فیزیکی برای بخار با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴ و ۱۸]:

$$\varepsilon_{ph} = [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (2)$$

که در این رابطه h و s به ترتیب آنتالپی و آنتروپی بخار می‌باشد. آگزرژی شیمیایی سوخت متشکل از آگزرژی شیمیایی سوخت ورودی به محفظه احتراق و داکت برنر^۱ است:

$$\sum_{i=1}^n \dot{E}x_i = \dot{E}x_{f,b} + \dot{E}x_{f,g} = e_f \cdot \dot{m}_{f,b} + e_f \cdot \dot{m}_{f,g} \quad (3)$$

که در این معادله \dot{m}_f دبی سوخت و e_f آگزرژی واحد جرم سوخت می‌باشد. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی برای محاسبه

۲.۱.۴. بازدهی انرژی

به طور کلی، برای فرایند جریان پایدار در حجم کنترل تجهیزاتی مانند توربین، کمپرسور، نازل، دیفیوزر، پمپ و مبدل‌های حرارتی، می‌توان مقدار بازدهی انرژی را با توجه به معادله تعادل انرژی از رابطه (۹) محاسبه کرد:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{E}x_D}{\sum_i \dot{E}x_i} \quad (9)$$

مقادیر انرژی از دست رفته و بازدهی انرژی در هر یک از اجزای نیروگاه بخار شهید رجایی، با استفاده از روابط تعادل انرژی قابل محاسبه است که تحلیل اقتصادی نیروگاه بر مبنای آن صورت می‌گیرد.

۲.۲. تحلیل اقتصادی

تحلیل انرژی دربرگیرنده اطلاعات و نتایج مفیدی برای محاسبه کامل طراحی و عملکرد یک سیستم انرژی از نقطه نظر ترمودینامیکی است، اما این تحلیل در تعیین هزینه‌های ناشی از انرژی از دست رفته اجزای سیستم کارآمد نیست. تعیین هزینه انرژی از دست رفته یک سیستم در ارتقای بهره‌وری هزینه آن سیستم بسیار مفید است. با توجه به اینکه متغیرهای ترموکنومیک با هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های مربوط به بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی در ارتباط‌اند، حداقل کردن هزینه یک سیستم حرارتی به معنای یافتن حالتی بهینه میان نرخ هزینه مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و انرژی از دست رفته است.

۱.۲.۴. هزینه‌های طبقه‌بندی شده

سری هزینه‌های سالیانه مربوط به هزینه‌های تحمیلی و مخارج سال‌آم از عملکرد نیروگاه یکسان نیستند. به طور کلی، هزینه‌های تحمیلی هنگامی که هزینه سوخت با افزایش سنوات عملکردی افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابد. مقدار طبقه‌بندی شده درآمد نهایی سالیانه مورد نیاز (TRR_L) می‌تواند با به‌کارگیری فاکتور تنزیل (بهره) و فاکتور برگشت سرمایه حاصل گردد:

$$TRR_L = CRF \sum_j^n \frac{TRR_j}{(1+i_{eff})^j} \quad (10)$$

در اینجا TRR_j درآمد سالیانه نهایی در سال j ام عملکرد نیروگاه، i_{eff} میانگین نرخ تنزیل سالیانه مؤثر و n نشان‌دهنده عمر مفید اقتصادی نیروگاه بر حسب سال است. فاکتور برگشت سرمایه ارائه شده در معادله بالا، توسط رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$CRF = \frac{i_{eff}(1+i_{eff})^n}{(1+i_{eff})^n - 1} \quad (11)$$

در این رابطه، فرض بر بررسی معالات پولی در انتهای سال است.

چنانچه دوره‌های پرداخت برای هزینه سوخت FC_j بر حسب زمان به‌جز برای یک نرخ تورم ثابت r_{FC} یکسان باشد، مقدار طبقه‌بندی شده FC_L دوره‌ها با ضرب هزینه سوخت FC_0 در آغاز اولین سال در فاکتور طبقه‌بندی تورم ثابت $CELF$ به دست می‌آید.

$$FC_L = FC_0 CELF = FC_0 \frac{k_{FC}^n (1 - k_{FC}^n)}{(1 - k_{FC})} CRF \quad (12)$$

که در آن:

$$k_{FC} = \frac{1 + r_{FC}}{1 + i_{eff}} \quad (13)$$

و نرخ تورم این پارامتر (r_{FC}) ثابت است. بر همین اساس، هزینه تعمیر و نگهداری طبقه‌بندی شده سالیانه (OMC_L) توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$OMC_L = OMC_0 CELF = OMC_0 \frac{k_{OMC}^n (1 - k_{OMC}^n)}{(1 - k_{OMC})} CRF \quad (14)$$

که در این رابطه:

$$k_{OMC} = \frac{1 + r_{OMC}}{1 + i_{eff}} \quad (15)$$

و نرخ تورم این پارامتر (r_{OMC}) ثابت است. همچنین هزینه‌های تحمیلی طبقه‌بندی شده (CC_L) از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$CC_L = TRR_L - FC_L - OMC_L \quad (16)$$

تفاوت اساسی میان تحلیل معمولی اقتصادی و تحلیل اقتصادی به‌عنوان بخشی از تحلیل ترموکنومیک، این است که دومین تحلیل بر اساس طبقه‌بندی وسیله انجام می‌شود. هزینه‌های تحمیلی سالیانه (\dot{Z}_k^{CI}) و هزینه‌های تعمیر و نگهداری (\dot{Z}_k^{OM}) نیروگاه مطابق با سهم جزء k ام از هزینه خرید کل، میان اجزای سیستم تقسیم می‌شود.

$$\dot{Z}_k^{CI} = \frac{CC_L}{\tau} \frac{PEC}{\sum_k PEC_k} \quad (17)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{OMC_L}{\tau} \frac{PEC}{\sum_k PEC_k} \quad (18)$$

در اینجا PEC_k و τ به ترتیب، معرف هزینه خرید تجهیزات جزء k ام نیروگاه و زمان سالیانه عملکرد نیروگاه بر حسب ساعت در بار کامل است و ترم \dot{Z}_k تعیین‌کننده نرخ هزینه مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد.

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (19)$$

نرخ هزینه طبقه‌بندی شده برای مخارج ناشی از سوخت سیستم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{C}_F = \frac{FC_L}{\tau} \quad (20)$$

هزینه‌های طبقه‌بندی شده مانند \dot{Z}_k^{CI} و \dot{Z}_k^{OM} و \dot{C}_F به‌عنوان اطلاعات ورودی تحلیل ترموکنومیک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

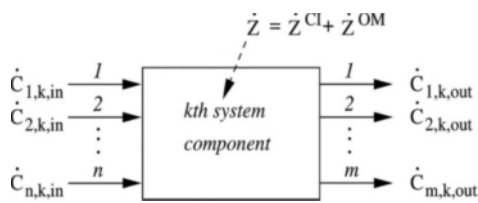
برای هر جزء سیستم به شکل مجزا فرموله شده است. معادله هزینه اعمال شده بر جزء k ام سیستم بیانگر این موضوع است که هزینه نهایی هر کدام از جریان‌های موجود برابر با هزینه نهایی جریان‌های ورودی به انضمام هزینه ناشی از سرمایه‌گذاری اولیه و مخارج تعمیر و نگهداری سیستم است.

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^n \dot{C}_{j,k,in} + \underbrace{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}_{\dot{Z}_k} = \sum_{j=1}^m \dot{C}_{j,k,out} \quad (27)$$

برای سیکل بخار بازتوانی شده نیروگاه شهید رجایی، از معادلات موجود در جدول (۱) محاسبه می‌شود. بنابراین، تعریف نرخ هزینه، در معادله (۲۸) خلاصه می‌شود (مطابق شکل ۳):

$$\sum_{j=1}^n (c_j \dot{E}_j)_{k,in} + \underbrace{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}_{\dot{Z}_k} = \sum_{j=1}^m (c_j \dot{E}_j)_{k,out} \quad (28)$$



شکل (۳): معادله هزینه برای اجزای سیستم

در این رابطه، نرخ آگزرژی ورودی و خروجی به جزء k ام سیستم در تحلیل آگزرژیکی محاسبه شده است. در تحلیل ترموآکونومیکی یک جزء، فرض بر این است که هزینه واحد آگزرژی (c_j)، برای همه جریان‌های ورودی معلوم است. این هزینه‌ها به دو شکل قابل دستیابی است:

۱. از جریان‌های خروجی از جزء؛
۲. از هزینه خرید تجهیزات؛ چنانچه جریان ورودی سیستم کلی باشد. در نتیجه، هزینه واحد آگزرژی جریان‌های خروجی، متغیر نامعلومی است که می‌بایست با هدف موازنه هزینه محاسبه شود.

۲.۳.۴. معادلات کمکی هزینه‌گذاری

زمانی که هزینه جریان‌های ورودی مشخص باشد، به دلیل تعدد بیش از یک جریان خروجی از یک جزء، استفاده از یک معادله هزینه خروجی برای تعیین هزینه جریان‌های خروجی کافی نیست؛ بنابراین، در حالت کلی، برخی معادلات کمکی فرموله برای هر جزء لازم است. تعداد معادلات موجود ۲ برابر جریان‌های خروجی از اجزا منهای یک است. معادلات کمکی بر مبنای اینکه جریان آگزرژی مورد نظر در محاسبات برای هر جزء ناشی از سوخت باشد یا محصول، با عنوان معادلات F یا P خوانده می‌شود.

۲.۲.۴. بازگشت سرمایه

موضوع مورد اهمیت دیگر، زمان بازگشت سرمایه‌گذاری اولیه است. با افزودن توربین گاز، سیکل و تجهیزات مرتبط با آن و مبدل‌های حرارتی و تغییر در آبگرمکن‌ها و زیرکشی توربین‌ها، سرمایه‌گذاری انجام شده باید طی زمان معقولی بازگشت داده شود. زمان بازگشت سرمایه‌گذاری اولیه در سیکل یک نیروگاه بخار توسط رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود [۴، ۳۱ و ۳۲]:

$$\text{payback} = \frac{Z_c \cdot n}{86400 \cdot c_{f,g} \cdot 365 \cdot \left(\frac{1}{\rho_{f,g}} \right) \cdot (\dot{m}_{f, \text{simple cycle}} - \dot{m}_{f, \text{repower cycle}})} \quad (21)$$

در این رابطه، n سال‌های عمر مفید نیروگاه است که در ایران، ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود. $c_{f,g}$ و $\rho_{f,g}$ به ترتیب، چگالی گاز طبیعی و هزینه یک مترمکعب گاز است که مقادیر ۰/۶۵ و ۱ دلار را به خود اختصاص می‌دهند [۳۳]. مقدار هزینه خرید تجهیزات (Z_c) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Z_c = \frac{TCL \cdot CRF}{\dot{W}_{net} \cdot H} \quad (22)$$

در این رابطه، H ساعت کارکرد نیروگاه در یک سال است. مقدار CRF که همان فاکتور بازگشت سرمایه است، از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود که در آن، i مقدار نرخ بهره است و در ایران، مقداری برابر ۱۷ درصد را به خود نسبت می‌دهد [۳۴].

۳.۴. هزینه‌گذاری آگزرژی

در هزینه‌گذاری آگزرژی هزینه‌ای برای هر یک از جریان‌های آگزرژی تعیین شده است. نرخ هزینه مربوط به جریان j ام به عنوان ایجاد نرخ جریان آگزرژی و میانگین هزینه هر واحد آگزرژی بیان شده است.

$$\dot{C}_j = \dot{E}_j \cdot c_j = \dot{m}_j \cdot e_j \cdot c_j \quad (23)$$

در اینجا e_j آگزرژی مخصوص بر پایه جریان جرمی است. مقدار هزینه نیز با توجه به انتقال آگزرژی حرارت و کار تعیین می‌شود:

$$\dot{C}_q = c_q \cdot \dot{Q} \quad (24)$$

$$\dot{C}_w = c_w \cdot \dot{W} \quad (25)$$

در این رابطه، c_q و c_w و c_j میانگین هزینه‌های واحد آگزرژی بر اساس دلار بر گیگاژول آگزرژی می‌باشد.

۱.۳.۴. معادله هزینه

هزینه‌گذاری آگزرژی دربرگیرنده معادلات هزینه‌ای است که معمولاً

جدول (۱): روابط هزینه سرمایه گذاری برای اجزای سیکل بخار بازتوانی شده نیروگاه شهید رجایی

ملاحظات	رابطه هزینه سرمایه گذاری	دستگاه
P_1, M_1 و T_1 به ترتیب فشار (MPa)، دبی جرمی ($\text{kg} \cdot \text{sec}^{-1}$) و دما (K) برای بخار فوق گرم است.	$Z_{BOI} = 20.1552224 \times 5 \exp(0.0014110564 \times P_1) \times \exp(0.7718795 \times \ln(M_1)) \times F_{AR} \times F_{AN} \times F_{AT}$	B-SH
$\Delta P_r = 0.16$ $\eta_{ir} = 0.95$ $f_{RH} = 0.12$	$F_{AN} = 1.0 + ((1 - \eta_{ir}) / (1 - \eta_i))^7$, $F_{AT} = 1.0 + 5 \times 5 \exp((T_1 - 1100) / 18.75)$ $F_{AR} = 1.0 + ((1 - \Delta P_r) / (1 - \Delta P))^8$, $Z_{B-SH} = (1 - f_{RH}) Z_{BOI}$, $Z_{RH} = f_{RH} Z_{BOI}$	RH
برای گرمکن آب تغذیه اول و دوم $a=6$ برای سایر گرمکن ها $a=4$	$Z_I^H = 1000 \times 0.02 \times 3.3 \times Q \left(\frac{1}{T_{TDD,I} + A} \right)^{0.1} (10 \Delta P_T)^{-0.08} (10 \Delta P_3)^{-0.04}$	FWH
برای توربین های فشار بالا $\eta_{tr} = 0.95$ برای توربین های فشار پایین $\eta_{tr} = 0.85$	$Z_I^T = 3000 \left[1 + 5 \times \exp \left(\frac{T_1 - 866}{10.42} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{1 - \eta_{tr}}{1 - \eta_{r,i}} \right) \right] W_T^{0.7}$	توربین
B اگزورزی تولیدی سیکل است.	$Z_I^P = 378 \left[1 + \left(\frac{1 - 0.808}{1 - \eta_{p,i}} \right)^3 \right] B^{0.71}$	پمپ
V_w نرخ جریان آب سرد در کندانسور بر حسب متر بر ثانیه و e بازدهی حرارتی کندانسور است.	$Z_{CND} = (1 / T_0 e) \left\{ 217 \left[\frac{0.247 + (1 / 3.24 V_w^{0.8})}{\times \ln(1 / (1 - e)) + 138} \right] \right\} (1 / (1 - \eta_c)) S$ $e = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{T_{in} - T_{wo}}; \eta_c = T_0 \frac{S_{in} - S_{out}}{h_{in} - h_{out}}$	CND
	$Z_{GEN} = 60 W_G^{0.95}$	GEN

قانون کلی در سیستم، جزء k ام نزدیکتر به جریان محصولات (سوخت) معمولاً مقدار $C_{F,k}$ بزرگتری دارد. برای $C_{P,k}$ نیز حالت مشابهی وجود دارد.

$$C_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (30)$$

با استفاده از معادلات (۲۹) و (۳۰)، معادله هزینه جزء k ام سیستم به شکل زیر نوشته می شود:

$$C_{P,k} \dot{E}_{P,k} = C_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k - \dot{C}_{L,k} \quad (31)$$

یکی از مهمترین جنبه های هزینه یابی اگزورزی، محاسبه هزینه اگزورزی از دست رفته در هریک از اجزای سیستم انرژی مدنظر است. نرخ هزینه $\dot{C}_{D,k}$ همراه با اگزورزی از دست رفته $\dot{E}_{D,k}$ در k امین جزء هزینه های پنهانی هستند که تنها از طریق تحلیل ترمو اکونومیکی آشکار می شوند. این مقادیر که جهت پاسخ به اگزورزی از دست رفته و تولید نرخ جریان اگزورزی مشابه محصولات تعیین می گردند، توسط هزینه سوخت اضافی جزء مورد نظر تقریب زده می شوند.

$$\dot{C}_{D,k} = C_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (32)$$

$$\dot{E}_{P,k} = \text{Const} \quad \text{زمانی که:}$$

هنگامی که اگزورزی از دست رفته کاهش یا راندمان افزایش یابد، برای طراحی بهتر اجزا در هزینه اگزورزی از دست رفته ($\dot{C}_{D,k}$) کاهش مشاهده می شود. این در حالی است که هزینه سرمایه گذاری اولیه (\dot{Z}_k^{CI}) افزایش می یابد. با این تفاسیر، بیشترین مقدار $\dot{C}_{D,k}$ به ازای حداقل مقدار \dot{Z}_k است.

معادلات F: هزینه نهایی مربوط به اگزورزی قابل استحصال از یک جریان اگزورزی در یک جزء، باید با هزینه اگزورزی که از جریان در بالادست جزء استحصال می شود، برابر باشد. اختلاف اگزورزی بین جریان ورودی و خروجی هر جزء، با تعریف سوخت برای جزء مورد نظر به دست می آید.

معادلات P: هر واحد اگزورزی در هر جریان مربوط به محصول یک جزء، در هزینه میانگین مشابه با $C_{P,k}$ تولید شده است. این هزینه از معادله هزینه و معادلات F محاسبه می شود.

۴.۴. متغیرهای ترمو اکونومیکی

تعریف سوخت و محصول برای محاسبه راندمان اگزورزی در هر جزء k ام منجر به التزام معرفی نرخ هزینه های مربوط به سوخت $\dot{C}_{F,k}$ و محصول $\dot{C}_{P,k}$ در آن جزء می شود. $\dot{C}_{F,k}$ نشان دهنده نرخ هزینه جریانی است که در آن، اگزورزی سوخت برای جزء k ام ایجاد شده است. $\dot{C}_{P,k}$ نرخ جریان هزینه مربوط به اگزورزی محصول برای همان جزء است. میانگین هزینه سوخت برای جزء k ام سیستم ($C_{F,k}$) بیانگر میانگین هزینه ای است که از هر واحد اگزورزی سوخت برای جزء k ام فراهم شده است.

$$C_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (29)$$

مقدار $C_{F,k}$ وابسته به دو پارامتر موقعیت جزء k ام در سیستم و ارتباط داخلی میان جزء مورد نظر با اجزاء دیگر است. به عنوان یک

۵. محاسبات طراحی

در طراحی یک سیستم حرارتی، محاسبات ترموآکونومیک جزئی بر مبنای متغیرهای ترموآکونومیک و آگرژی (که هر کدام برای جزء k محاسبه شده‌اند) صورت می‌پذیرد. مقادیر تمامی این متغیرها (ترموآکونومیکی و آگرژیکی) وابسته به نوع اجزا هستند [۳۵]؛ برای مثال، مقدار فاکتور آگرژی آکونومیک برای کمپرسور و توربین‌ها بین ۲۵ تا ۶۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. معادلات لازم برای محاسبه هزینه واحد آگرژی جریان‌های خروجی مربوط به اجزای نیروگاه بازتوانی شده، در جدول (۲) ارائه شده است.

۶. نتایج و تحلیل

برای ارتقای بهره‌وری هزینه کل سیستم، استفاده از نکات زیر برای محاسبات جزء k مفید می‌باشد [۳۸-۳۶]:

۱. با توجه به اهمیت هزینه‌ای، اجزا در یک ترتیب نزولی با استفاده از

$$\text{مجموع } \dot{Z}_k^{CI} + \dot{C}_{D,k} \text{ رتبه‌بندی می‌شوند.}$$

۲. تغییرات طراحی اولیه روی جزئی انجام می‌شود که مقدار حاصل

$$\text{مجموع } \dot{Z}_k^{CI} + \dot{C}_{D,k} \text{ در آن بیشتر باشد.}$$

۳. زمانی که نرخ هزینه \dot{Z}_k^{CI} و $\dot{C}_{D,k}$ زیاد است، اجزایی که تفاوت هزینه مربوط به r_k آن‌ها بیشتر باشد، اهمیت ویژه‌ای دارند.

۴. فاکتور آگرژی آکونومیک f_k ، جهت شناسایی منبع اصلی هزینه (سرمایه‌گذاری اولیه یا هزینه آگرژی از دست‌رفته) به‌کار می‌رود.

الف: در صورت زیاد بودن مقدار f_k ، تحقیق می‌شود که آیا

بهره‌وری هزینه برای کاهش سرمایه‌گذاری اولیه k امین جزء در هزینه راندمان جزء مؤثر است یا نه؟

ب: اگر مقدار f_k کم باشد، سعی بر بهبود راندمان جزء توسط سرمایه‌گذاری اولیه است.

۵. هر فرایند زیرمجموع که آگرژی از دست‌رفته یا تلفات آگرژی سایر اجزاء را افزایش دهد (بدون شرکت در کاهش سرمایه‌گذاری اولیه یا هزینه‌های سوخت)، حذف می‌شود.

۶. اگر راندمان آگرژی سیستم کم باشد یا نرخ حرارت یا نسبت آگرژی از دست‌رفته آن زیاد باشد، علاوه بر تحلیل اقتصادی، تحلیل آگرژی نیز اهمیت پیدا می‌کند.

نتایج مرحله اول محاسبات ترموآکونومیکی نیروگاه تولید هم‌زمان و بازتوانی شده شهید رجایی با درصد تغییرات زیرکش ۸۰ درصد در جدول (۳) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۴)، بویلر و در درجه بعد، توربین‌های بخار منابع اصلی هزینه در این نیروگاه‌اند. این دو بخش بیشترین نرخ هزینه

یکی از جالب‌ترین وجوه ترموآکونومیک، تخمین و مقایسه هزینه آگرژی از دست‌رفته یک جزء با هزینه‌های سرمایه‌گذاری جزء مشابه می‌باشد. این مقایسه سبب تسهیل تصمیم‌گیری در مورد تغییرات طرح می‌شود. این تغییرات امکان ارتقای اثر هزینه کل سیستم را ممکن می‌سازد. در بهینه‌سازی ترموآکونومیک، سعی بر آن است که موازنه‌ای مناسب بین هزینه آگرژی از دست‌رفته ($\dot{E}_{D,k}$) و سرمایه‌گذاری اولیه (\dot{Z}_k) یافت شود. مقادیر آگرژی از دست‌رفته ($\dot{C}_{D,k}$) نمی‌توانند برای محاسبه مقدار آگرژی از دست‌رفته برای گروهی از اجزاء اضافه شوند. این امر بدین دلیل است که هریک از مقادیر آگرژی از دست‌رفته، شامل اطلاعات مربوط به تعامل میان هزینه آگرژی از دست‌رفته در اجزای جریان بالادست می‌باشد. مقدار هزینه آگرژی از دست‌رفته (\dot{C}_D) برای گروه، با استفاده از میانگین هزینه هر واحد آگرژی از سوخت (C_F) و نرخ آگرژی از دست‌رفته در گروه محاسبه می‌شود.

اجزایی که کاهش $C_{P,k}^Z$ در آن‌ها با افزایش راندمان همراه است، به محاسبه در محاسبات ترموآکونومیکی نیازی ندارند؛ زیرا مسئله بهینه‌سازی پیچیده‌ای برای این اجزاء وجود ندارد. از میان راه حل‌های موجود، استفاده از اجزای مؤثرتر، پیشنهاد مناسبی می‌باشد. در این اجزاء هزینه سوخت و هزینه سرمایه‌گذاری ویژه مقادیر کمتری را به خود اختصاص داده‌اند؛ در نتیجه، مقدار $\dot{C}_{P,k}$ در آن‌ها حداقل مقدار را دارد. اختلاف هزینه بین میانگین هزینه هر واحد آگرژی محصول و سوخت (r_k) توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$r_k \equiv \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{\left[c_{F,k} (\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k}) + (\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}) \right]}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \quad (33)$$

معادله فوق منابع هزینه واقعی در k امین جزء را مشخص می‌کند. این منابع عبارت‌اند از: هزینه سرمایه‌گذاری (\dot{Z}_k)، آگرژی از دست‌رفته در یک جزء (که به وسیله $\dot{C}_{D,k}$ بیان می‌شود)، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و تلفات آگرژی. هزینه سرمایه‌گذاری و آگرژی از دست‌رفته در یک جزء، اهمیت بسیاری دارند و برای محاسبه فاکتور آگرژی آکونومیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. فاکتور آگرژی-آکونومیک بیان‌کننده نسبت سهم هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و آگرژی از دست‌رفته می‌باشد.

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k^{CI}}{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{C}_{D,k}} = \frac{\dot{Z}_k^{CI}}{\dot{Z}_k^{CI} + c_{F,k} \dot{E}_{D,k}} \quad (34)$$

متغیرهای ترموآکونومیک \dot{Z}_k^{CI} و $\dot{C}_{D,k}$ اندازه مطلق اهمیت جزء k را بیان می‌کنند که متغیرهای r_k و f_k مشخص‌کننده مقادیر بهره‌وری هزینه‌ای جزء می‌باشند.

جدول (۲): معادلات هزینه برای محاسبه هزینه‌های واحد انرژی جریان‌های خروجی در نیروگاه شهید رجایی

حجم کنترل	معادلات هزینه
	$\dot{C}^f + \dot{C}_4^{st} + \dot{C}_{23}^{st} - \dot{C}_5^{st} - \dot{C}_1^{st} + \dot{Z}_{boiler} = 0$
	$\dot{C}_1^{st} - \dot{C}_2^{st} - \dot{C}_4^{st} - \dot{C}^w + \dot{Z}_{HPT1} = 0$
	$\dot{C}_{14}^{st} - \dot{C}_{16}^{st} - \dot{C}^w + \dot{Z}_{LPT4} = 0$
	$\dot{C}_{16}^{st} + \dot{C}_{28}^{st} - \dot{C}_{17}^{st} - \dot{C}^{cold\ water} + \dot{Z}_{cond} = 0$
	$\dot{C}_{17}^{st} + \dot{C}_{15}^{st} + \dot{C}_{27}^{st} - \dot{C}_{18}^{st} - \dot{C}_{28}^{st} + \dot{Z}_{LPFWH3} = 0$
	$\dot{C}_{20}^{st} + \dot{C}_9^{st} + \dot{C}_{25}^{st} - \dot{C}_{21}^{st} + \dot{Z}_{dr} = 0$
	$\dot{C}_{22}^{st} + \dot{C}_3^{st} - \dot{C}_{23}^{st} - \dot{C}_{24}^{st} + \dot{Z}_{HPFWH1} = 0$

را به سیکل تحمیل می‌کنند. به این ترتیب، برای دستیابی به نرخ هزینه و فاکتور بهره‌وری اقتصادی مطلوب در این اجزا، تغییراتی در دبی زیرکش توربین‌های بخار صورت می‌گیرد. در این باره، نخست به بررسی آنالیز حساسیت فاکتور بهره‌وری براساس تغییر دبی زیرکش توربین‌های بخار پرداخته می‌شود.

۱.۶. آنالیز حساسیت جزء به جزء پارامترها

در این حالت، مقادیر تابع بهره‌وری توربین‌های بخار با تغییر مستقل دبی تک‌تک زیرکش‌های توربین بخار حاصل می‌شود. در نمودارهای شکل (۴) دیده می‌شود که تغییرات دبی زیرکش توربین فشار بالای اول در فاکتور بهره‌وری سایر توربین‌ها بی‌تأثیر بوده، اما با افزایش دبی زیرکش این توربین، فاکتور بهره‌وری هزینه آن زیاد می‌شود. پس با توجه به نتایج بخش انرژی، دبی زیرکش توربین فشار بالای اول، نباید به مقدار زیادی کاهش یابد. همچنین نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش دبی زیرکش توربین فشار بالای دوم، تغییرات چندانی در فاکتور بهره‌وری هزینه این توربین دیده نمی‌شود.

جدول (۳): مشخصات ترموکنومیک سیکل تولید هم‌زمان بازتوانی‌شده نیروگاه شهید رجایی

CV	type	point	Ex (MJ.sec ⁻¹)	c (\$/Mw ⁻¹)	C (\$/h ⁻¹)	Z _k (\$/h ⁻¹)	CD (\$/h ⁻¹)	r _k	f _k	η _{Ex}
Boiler	ورودی	۲۳	۵۱/۶۴۸	۰/۰۰۲	۰/۱۰۳۲۹۶					
	خروجی	۱	۳۱۹/۵۱۵	۰/۰۰۲	۰/۶۳۹۰۳					
	ورودی	۴	۲۲۴/۱۷۲	۰/۰۰۲	۰/۴۴۸۳۴۴	۱۹۹/۲	۶۱/۷۳	۰/۷۳۶	۰/۴۹۴	۰/۹۶۸
	خروجی	۵	۳۱۰/۷۲۷	۰/۰۰۲	۰/۶۲۱۴۵۴					
HPT1	ورودی	۱	۳۱۹/۵۱۵	۰/۰۰۲	۰/۶۳۹۰۳					
	خروجی	۲	۱۴/۷۸۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲۹۵۷۲	۷/۳۷۸	۱/۹۴۰	۰/۴۵۲	۰/۴۳۷	۰/۹۶۹
	خروجی	۴	۲۲۴/۱۷۲	۰/۰۰۲	۰/۴۴۸۳۴۴					
HPT2	ورودی	۵	۳۱۰/۷۲۷	۰/۰۰۲	۰/۶۲۱۴۵۴					
	خروجی	۶	۱۱/۷۷۵	۰/۰۰۲	۰/۰۲۳۵۵	۴/۵۳۰	۸/۰۲۸	۰/۴۷۵	۰/۴۹۱	۰/۸۷۰
	خروجی	۶-خ	۲۱۷/۲۵۱	۰/۰۰۲	۰/۴۳۴۵۰۲					
HPT3	ورودی	۶-خ	۳۱۰/۷۲۷	۰/۰۰۲	۰/۶۲۱۴۵۴					
	خروجی	۸	۶/۸۳۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳۶۷۶	۲/۷۳۸	۳/۱۸۰	۰/۲۶۰	۰/۴۹۴	۰/۹۹۲
LPT1	ورودی	۸-خ	۱۶۳/۲۴۷	۰/۰۰۲	۰/۳۲۶۴۹۴					
	خروجی	۱۰	۳/۵۲۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷۰۵۶	۷/۴۴۱	۶/۲۱۵	۰/۸۳۶	۰/۴۵۰	۰/۹۸۰
LPT2	ورودی	۱۰-خ	۱۱۷/۱۱۷	۰/۰۰۲	۰/۲۳۴۲۳۴					
	خروجی	۱۲	۳/۵۶۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷۱۲۶	۵/۸۳۶	۳/۵۹۷	۰/۹۷۰	۰/۴۹۲	۰/۹۸۵
LPT3	ورودی	۱۲-خ	۹۱/۳۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۸۲۶۰۲					
	خروجی	۱۴	۲/۵۳۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵۰۷۸	۲۰/۱۳	۳۲/۵۷	۰/۹۰۴	۰/۴۹۴	۰/۹۸۲
LPT4	ورودی	۱۴-خ	۶۳/۸۹۱	۰/۰۰۲	۰/۱۲۷۷۲۸					
	خروجی	۱۶	۳۹/۱۳۹	۰/۰۰۲	۰/۰۷۸۲۷۸	۱۵/۷۱	۱۵/۱۸	۰/۷۵۵	۰/۴۹۴	۰/۹۷۱
LPFWH3	ورودی	۱۷	۱/۴۳۲	۴/۰۶۸	۵/۸۲۵۳۷۶					
	خروجی	۱۸	۳/۶۸۸	۱/۰۹۲	۴/۰۲۷۲۹۶					
	ورودی	۱۵	۲/۵۳۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵۰۷۸	۰/۳۸۰	۰/۱۹۵	۰/۳۰۳	۰/۶۶۰	۰/۹۸۳
	ورودی	۲۷	۱/۳۰۱	۳/۰۳۲	۳/۹۴۴۶۳۲					
	خروجی	۲۸	۲/۲۳۷	۲/۶۰۳	۵/۸۲۲۹۱۱					

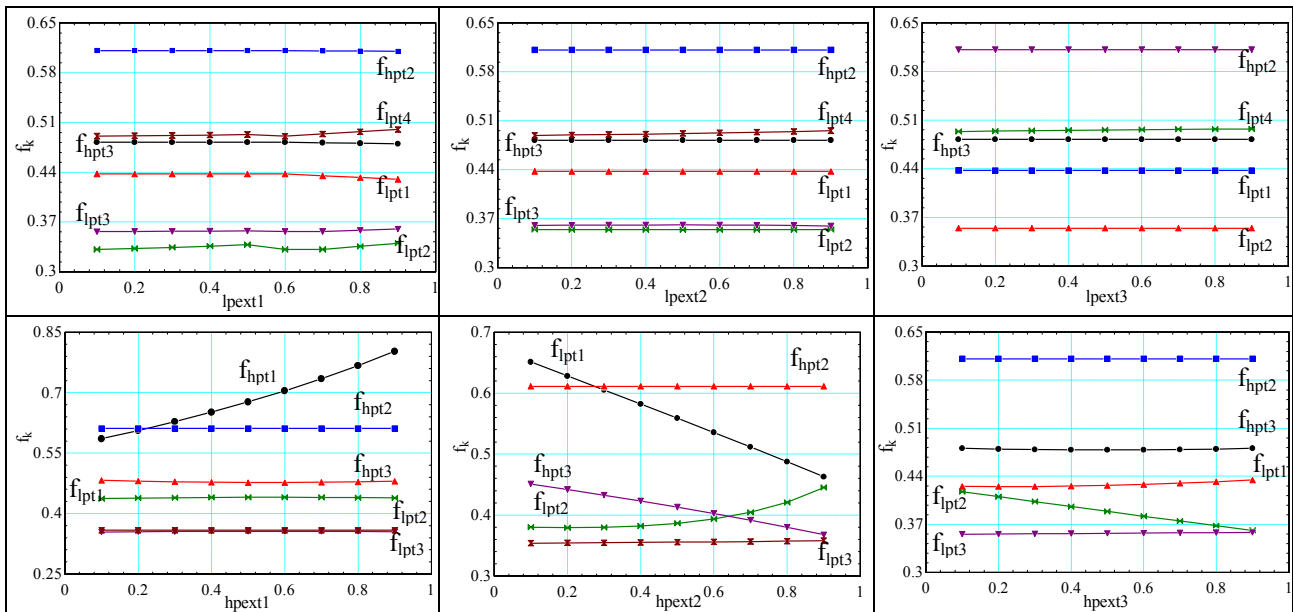
CV	type	point	Ex (MJ.sec ⁻¹)	c (\$Mw ⁻¹)	C (\$h ⁻¹)	Z _k (\$h ⁻¹)	CD (\$h ⁻¹)	r _k	f _k	η _{Ex}
LPFWH2	ورودی	۱۸	۳/۶۸۸	۱/۰۹۲	۴/۰۲۷۲۹۶					
	خروجی	۱۹	۶/۸۸۸	۰/۲۶۸	۱/۸۴۵۹۸۴					
	ورودی	۱۳	۳/۵۶۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷۱۲۶	۰/۴۴۰	۰/۶۴۲	۰/۵۳۸	۰/۴۰۶	۰/۹۶۴
	خروجی	۲۶	۳/۶۱۳	۳/۵۶۷	۱/۲۸۸۷۵۷					
LPFWH1	ورودی	۱۹	۶/۸۸۸	۰/۲۶۸	۱/۸۴۵۹۸۴					
	خروجی	۲۰	۱۰/۴۴۱	۰/۱۶۵	۱/۷۲۲۷۶۵	۰/۳۷۰	۰/۹۳۵	۰/۷۵۰	۰/۲۸۳	۰/۹۵۲
	ورودی	۱۱	۳/۵۲۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷۰۵۶					
Dearator	خروجی	۲۶	۳/۶۱۳	۳/۵۶۷	۱/۲۸۸۷۵۷					
	ورودی	۲۰	۱۰/۴۴۱	۰/۱۶۵	۱/۷۲۲۷۶۵					
	ورودی	۹	۶/۸۳۸	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳۶۷۶	۰/۴۴۰	۰/۶۷۰	۰/۴۲۸	۰/۳۹۶	۰/۹۲۷
HPFWH2	ورودی	۲۵	۴/۵۵۹	۰/۲۳۰	۱/۰۴۸۵۷					
	خروجی	۲۱	۲۲/۶۵۶	۰/۰۴۶	۱/۰۴۲۱۷۶					
	ورودی	۲۱	۲۲/۶۵۶	۰/۰۴۶	۱/۰۴۲۱۷۶					
HPFWH1	خروجی	۲۲	۳۴/۹۴۵	۰/۰۱۵	۰/۵۲۴۱۷۵	۰/۳۰۵	۰/۵۰۰	۰/۴۶۳	۰/۳۷۸	۰/۹۵۵
	ورودی	۷	۱۱/۷۷۵	۰/۰۰۲	۰/۰۲۳۵۵					
	ورودی	۲۴	۳/۳۰۰	۰/۱۶۲	۰/۵۳۴۶					
	خروجی	۲۵	۴/۵۵۶	۰/۲۳۰	۱/۰۴۷۸۸					
HPFWH1	ورودی	۲۲	۳۴/۹۴۵	۰/۰۱۵	۰/۵۲۴۱۷۵					
	خروجی	۲۳	۵۱/۶۴۸	۰/۰۰۲	۰/۱۰۳۲۹۶	۰/۲۴۲	۰/۴۷۷	۰/۴۹۰	۰/۳۳۶	۰/۹۵۹
	ورودی	۳	۱۴/۷۸۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲۹۵۷۲۰					
Condansor	خروجی	۲۴	۳/۳۰۰	۰/۱۶۲	۰/۵۳۴۶					
	ورودی	۱۶	۳۹/۱۳۹	۰/۰۰۲	۰/۰۷۸۲۷۸					
	ورودی	۲۸	۲/۲۳۷	۲/۶۰۳	۵/۸۲۲۹۱۱	۱/۰۷۴	۳/۱۴۰	۰/۷۷۷	۰/۳۶۵	۰/۹۲۸
	خروجی	۱۷	۱/۴۳۲	۴/۰۶۸	۵/۸۲۵۳۷۶					

نیز در تغییر فاکتور بهره‌وری سایر توربین‌ها و خود توربین تأثیر چندانی ندارد؛ ولی در خصوص توربین فشار پایین اول، افزایش این دبی باعث کاهش فاکتور بهره‌وری هزینه می‌شود. پس می‌توان بهترین شرایط دبی این زیرکش را کمترین مقدار آن دانست. به‌طور کلی، تغییرات دبی زیرکش در توربین‌های فشار پایین تغییر چشمگیری در تغییر فاکتور بهره‌وری توربین مورد نظر و سایر توربین‌ها ندارد.

اما این افزایش دبی، کاهش محسوس فاکتور بهره‌وری در توربین‌های فشار پایین و افزایش فاکتور بهره‌وری توربین فشار بالای بعد را به همراه دارد. از آنجایی که توربین‌های فشار پایین در تعیین هزینه‌ها در سطوح بالاتر (مجموع $\dot{Z}_k^{CI} + \dot{C}_{D,k}$ بالاتر) قرار دارند (جدول ۳)، کاهش دبی زیرکش توربین فشار بالای دوم در رکود هزینه‌ها تأثیر بیشتری دارد. تغییرات دبی زیرکش توربین فشار بالای سوم

جدول (۴): طبقه‌بندی نزولی اجزای نیروگاه برحسب اهمیت هزینه‌ای

CV	Z _k (\$h ⁻¹)	C _D (\$h ⁻¹)	Z _k +C _D (\$h ⁻¹)	r _k	f _k	η _{Ex}
Boiler	۱۹۹/۲	۶۱/۸۳	۲۶۰/۹	۰/۷۳۶	۰/۷۶۳	۰/۹۶۸
LPT3	۲۰/۱۳	۳۷/۵۵	۵۷/۶۸	۰/۹۰۴	۰/۳۴۸	۰/۹۸۲
LPT4	۱۷/۳۳	۱۸/۲۲	۳۵/۵۵	۰/۷۵۵	۰/۴۸۷	۰/۹۷۱
LPT1	۷/۶۰۱	۸/۱۵۰	۱۵/۷۵۱	۰/۸۳۶	۰/۴۸۲	۰/۹۸۲
LPT2	۵/۹۹۲	۹/۵۷۰	۱۵/۵۶۲	۰/۹۷۰	۰/۳۸۵	۰/۹۸۵
HPT1	۷/۳۷۸	۲/۲۴۰	۹/۶۱۸	۰/۴۵۲	۰/۷۶۷	۰/۹۶۹
HPT2	۴/۵۳۰	۲/۸۸۰	۷/۴۱	۰/۴۷۵	۰/۶۱۱	۰/۸۷۰
HPT3	۲/۷۳۸	۳/۸۰۰	۶/۵۳۸	۰/۲۶۰	۰/۴۱۸	۰/۹۹۲
Condansor	۱/۰۷۴	۰/۳۱۴	۱/۳۸۸	۰/۷۷۷	۰/۳۶۵	۰/۹۲۸
LPFWH1	۰/۳۷۰	۰/۹۳۵	۱/۳۰۵	۰/۷۵۰	۰/۲۸۳	۰/۹۵۲
Dearator	۰/۴۴۰	۰/۶۷۰	۱/۱۱	۰/۴۲۸	۰/۳۹۶	۰/۹۲۷
LPFWH2	۰/۴۴۰	۰/۶۴۲	۱/۰۸۲	۰/۵۳۸	۰/۴۰۶	۰/۹۶۴
HPFWH2	۰/۳۰۵	۰/۵۰۰	۰/۸۰۵	۰/۴۶۳	۰/۳۷۸	۰/۹۵۵
HPFWH1	۰/۲۴۲	۰/۴۷۷	۰/۷۱۹	۰/۴۹۰	۰/۳۳۶	۰/۹۵۹
LPFWH3	۰/۳۸۰	۰/۱۹۵	۰/۵۷۵	۰/۳۰۳	۰/۶۶۰	۰/۹۸۳



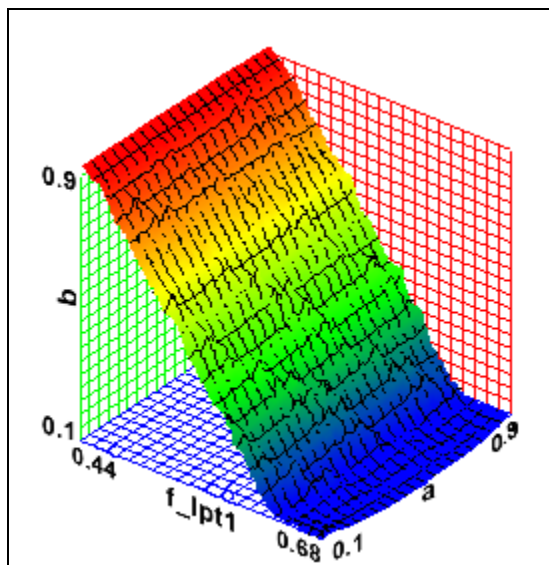
شکل (۴): تغییرات فاکتور بهره‌وری هزینه با تغییر دبی زیرکش توربین‌ها

۲.۶. آنالیز حساسیت با سه متغیر مستقل

در این روش، ابتدا با ثابت نگه داشتن دبی زیرکش توربین‌های فشار پایین در مقدار اولیه آن‌ها، تغییرات تابع هدف، براساس تغییر هر سه دبی زیرکش توربین‌های فشار بالا بررسی می‌شود. به این ترتیب، تأثیر هم‌زمان تغییرات دبی زیرکش‌های سه توربین فشار بالا مورد توجه قرار گرفته و دقت و اعتبار تحلیل افزایش می‌یابد. نمودار شکل (۵)، تابعی است خطی از درجه ۴ که در آن، تابع هدف برحسب سه متغیر a ، b و c که معرف تغییرات مقادیر دبی زیرکش توربین‌های فشار بالا هستند، تحلیل شده است. شکل پارامتری تابع هدف در این تحلیل، به صورت زیر ارائه شده است:

$$\eta_{Ex} = a_0 + a_1.a + a_2.a^2 + a_3.a^3 + a_4.a^4 + a_5.b + a_6.b^2 + a_7.b^3 + a_8.b^4 + a_9.c + a_{10}.c^2 + a_{11}.c^3 + a_{12}.c^4 \quad (35)$$

این خطی سازی در دقت ۹۹/۹۸ درصد و خطای عددی از توان (۱۶-) به دست آمده است. با محاسبه ضرایب این تابع و رسم رویه حاصل از آن، تغییرات مقادیر تابع هدف بررسی می‌شود. نمودار شکل (۵) نشان می‌دهد که بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری هزینه برای توربین فشار پایین اول، حدود ۰/۶۴۴ است که در شرایط دبی ارائه شده در جدول (۵) اتفاق می‌افتد.



شکل (۵): تغییرات فاکتور بهره‌وری برای lpt1 برحسب تغییرات هم‌زمان دبی زیرکش توربین‌های فشار بالا

مطابق نمودار شکل (۶) بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری هزینه برای توربین‌های فشار پایین دوم، حدود ۰/۴۹۲ است که در شرایط جدول (۶) حاصل می‌گردد.

جدول (۶): شرایط تعیین شده در بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری هزینه برای توربین فشار پایین دوم

Hpext1	Hpext2	Hpext3	F _{k,lpt2}
۰/۳۲۱	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۴۹۲

جدول (۵): شرایط تعیین شده در بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری هزینه برای توربین فشار پایین اول

Hpext1	Hpext2	Hpext3	F _{k,lpt1}
۰/۳۷۶	۰/۱۰۰	۰/۹۰۰	۰/۶۴۴

حالت‌های آنالیز حساسیت، پارامترهای مربوط به توربین گاز بدون تغییر فرض شده است. هدف از حل مسئله حاضر با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دستیابی به بالاترین مقدار راندمان آگرژی (η_{Ex}) سیکل باز توانی شده می‌باشد. با توجه به آنالیز حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای تأثیرگذار، راندمان آگرژی بهینه نیروگاه، مقداری مابین ۳۵ تا ۴۱ درصد را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به محدوده تغییرات ذکر شده برای تابع هدف، پارامترهای مؤثر در بهینه‌سازی باز توانی به کمک الگوریتم ژنتیک به صورت زیر انتخاب شده است [۳۹]:

۱. تعداد جمعیت اولیه: ۱۶ ترکیب از مقادیر دبی زیرکش توربین‌های بخار به صورت تصادفی انتخاب شده است.
 ۲. تعداد افراد نسل بعد: پس از پردازش داده‌ها، با ترکیب انتخاب شده در جمعیت اولیه، ۶۴ زوج از ترکیباتی که بیشترین مقدار راندمان آگرژی را به خود اختصاص داده‌اند، به عنوان نسل بعد باقی می‌مانند.
 ۳. بیشترین نرخ جهش: بیشترین نرخ جهش تابع هدف برابر ۰/۲۶۲۵ در نظر گرفته شده است. این مقدار در برخی از مراحل و به صورت تصادفی، به تابع هدف اضافه می‌شود. وجود این ترم جهت حفظ تنوع داده‌ها می‌باشد.
- جدول (۸) شامل نتایج بهینه‌سازی با استفاده از سه روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک، آنالیز حساسیت با سه متغیر و آنالیز حساسیت تک‌متغیره است. در این جدول، مقادیر بهینه بهره‌وری توربین‌های بخار و دبی زیرکش متناسب جهت دستیابی به این شرایط بهینه، برای سه روش ارائه شده است.

در توربین فشار پایین سوم، بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری برابر ۰/۳۶۵ است (شکل ۷) که با اعمال داده‌های جدول (۷) به دست می‌آید.

جدول (۷): شرایط تعیین شده در بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری هزینه برای توربین فشار پایین سوم

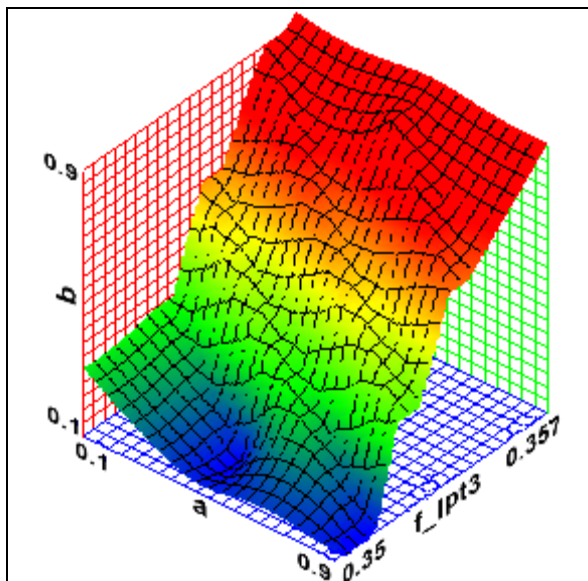
F _{k,lpt3}	H _{pext1}	H _{pext2}	H _{pext3}	F _{k,lpt3}
۰/۳۵۶	۰/۳۴۸	۰/۹۰۰	۰/۸۶۴	۰/۳۵۶

مطابق آنالیز حساسیت انجام شده در بخش قبل، تغییرات دبی زیرکش توربین‌های بخار فشار پایین در میزان بهره‌وری، تأثیر چندانی ندارد. همچنین محدوده تغییرات تابع هدف در توربین فشار بالای سوم نیز بسیار کوچک و قابل چشم‌پوشی است. به این ترتیب، حالتی مطابق داده‌های جدول (۸) (میانگین‌گیری از داده‌های جداول (۶) و (۷)) به دست خواهد آمد (نتایج با استفاده از الگوریتم ژنتیک، آنالیز حساسیت سه‌متغیره و تک‌متغیره) که بهترین حالت برای دستیابی به بیشترین مقدار فاکتور بهره‌وری هزینه در توربین‌های فشار پایین است.

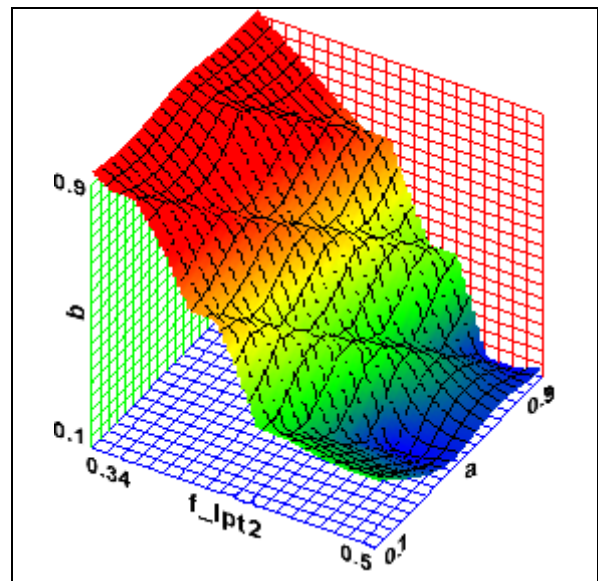
۳.۶. بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک

در این روش، متغیرهایی که تغییرات آن در بازدهی آگرژی سیکل مؤثر است، به عنوان متغیر مستقل انتخاب شده است. تغییرات دبی زیرکش‌های توربین بخار، ۶ متغیر مستقلی است که می‌توان برحسب آن‌ها تابع هدف را بهینه کرد.

با استناد به بخش قبل، دبی زیرکش توربین‌های بخار در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ مقدار اولیه تغییر می‌کند. همچنین، در این بهینه‌سازی همانند



شکل (۷): تغییرات فاکتور بهره‌وری برای lpt3 برحسب تغییرات همزمان دبی زیرکش توربین‌های فشار بالا



شکل (۶): تغییرات فاکتور بهره‌وری برای lpt2 برحسب تغییرات همزمان دبی زیرکش توربین‌های فشار بالا

جدول (۸): نتایج بهینه‌سازی دبی زیرکش‌های توربین بخار به روش الگوریتم ژنتیک و آنالیز حساسیت

نوع روش	Hpext1	Hpext2	Hpext3	Lpext1	Lpext2	Lpext3	$f_{k,lp1}$	$f_{k,lp2}$	$f_{k,lp3}$
الگوریتم ژنتیک	۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۹۰	۰/۱۰	۰/۵۳	۰/۱۲	۰/۶۴۴	۰/۴۲۲	۰/۳۵۳
آنالیز حساسیت با سه متغیر	۰/۹۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۰-۰/۹۰	۰/۱۰-۰/۹۰	۰/۱۰-۰/۹۰	۰/۶۰۶	۰/۴۸۲	۰/۳۵۱
آنالیز حساسیت تک‌متغیره	۰/۳۵	۰/۱۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۶۲۷	۰/۴۶۷	۰/۳۵۳

۵.۶. مشخصات فنی بازتوانی نیروگاه پس از بهینه‌سازی

در بهینه‌سازی بازتوانی یک نیروگاه با روش گرمایش آب تغذیه، مؤثرترین جزء، آبگرمکن‌های آب تغذیه است. با در نظر گرفتن تغییرات بهینه دبی زیرکش‌های توربین بخار ارائه شده در جدول (۸) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نتایج جدول (۹) برای مشخصات نیروگاه بازتوانی حاصل می‌شود.

جدول (۹): مشخصات ترمودینامیکی سیکل بازتوانی نیروگاه

پارامتر	واحد	نیروگاه پایه	نیروگاه بازتوانی شده	بهبود (%)
راندمان ترمودینامیکی	%	۳۹/۴	۴۲/۲	۷/۱
راندمان آگزرژی	%	۳۵/۱۶	۴۰/۱۷	۱۴/۲۵
توان توربین بخار	MW	۲۵۰	۲۷۳/۶۶۷	۹/۴۷
توان توربین گاز	MW	---	۲۰۱/۲	---

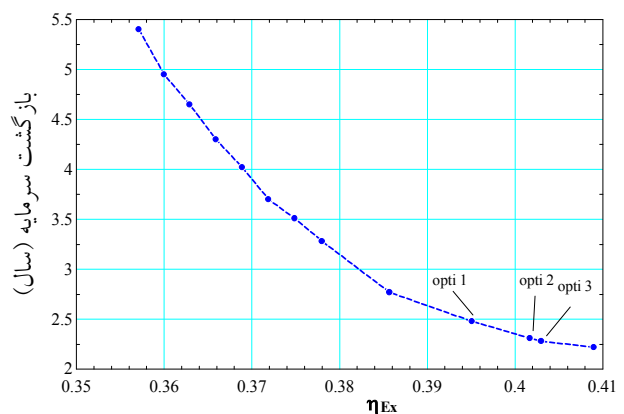
۷. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر، مؤید این موضوع است که بازتوانی نیروگاه با روش گرمایش آب تغذیه، راندمان حرارتی و آگزرژی نیروگاه را به ترتیب، به ۴۲/۲ و ۴۰/۱۷ درصد ارتقا داده است. این ارتقا به معنای افزایش راندمان به مقدار ۲/۸ و ۵/۰۱ درصد به ترتیب برای راندمان حرارتی و راندمان آگزرژی است. همچنین، این تحقیق نشان می‌دهد که زمان بازگشت سرمایه‌گذاری اولیه به صاحبان سرمایه ۲۵ ماه بوده که منشأ این بازگشت سرمایه، صرفه‌جویی حاصل از افزایش توان و بهبود راندمان آگزرژی نیروگاه بازتوانی شده می‌باشد. زمان بازگشت سرمایه در این روش، از حالت ایده‌آل که ۵ سال می‌باشد، کمتر است و این به معنای مطمئن بودن سرمایه‌گذاری است. در نتیجه، از مقدار بهینه به دست آمده می‌توان به‌طور عملی، در بهبود بهره‌وری نیروگاه استفاده کرد.

اگرچه استفاده از روش الگوریتم ژنتیک دقیق‌ترین جواب‌ها را ارائه می‌دهد، استفاده از آنالیز حساسیت قبل از بهینه‌سازی، جهت پیگیری بیشتر روند بهینه‌سازی، مشاهده تأثیر مجزای هر یک از پارامترها و مقایسه آن‌ها با نتایج نهایی، دربرگیرنده نکات مفیدی می‌باشد.

۴.۶. بازگشت سرمایه اولیه

برای تأیید نهایی عملی بودن نتایج پژوهش حاضر، بررسی اقتصادی نتایج پس از بهینه‌سازی تابع هدف براساس متغیرهای مستقل الزامی است. نمودار شکل (۸) زمان بازگشت سرمایه اولیه برحسب تغییرات آگزرژی متأثر از تغییرات دبی زیرکش توربین‌های بخار را نشان می‌دهد.



شکل (۸): نمودار تغییرات زمان بازگشت سرمایه برحسب تغییرات راندمان آگزرژی سیکل بازتوانی شده

روند نزولی نمودار با افزایش بیش از یک درصدی بازده آگزرژی تقریباً ثابت بوده و هر سه نقطه یک تا سه در بخش ثابت نمودار قرار می‌گیرند. در واقع نقاط ۱ تا ۳ همان نقاطی هستند که بهینه‌ترین مقدار بازدهی آگزرژی در سه روش مورد بررسی (الگوریتم ژنتیک، آنالیز حساسیت با سه متغیره و آنالیز حساسیت تک‌متغیره) را به خود اختصاص داده‌اند.

مراجع

- [1] Erlach, B., Satsaronis, G.T., Cziesla, F. "A New Approach for as-Signing Costs and Fuels to Cogeneration Products", In ECOS'01, Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems, pp. 759-770, Istanbul, Turkey, July 4-6, 2001.
- [2] Reynolds, G., "Repowering: Enhance what is there", IEEE Engineering Review, 2001.
- [3] Converting 3×360 Mw at Senoko, Alstom Staff Report, 1999.
- [4] Brander, J. A., Chase, D. L. "Repowering Application Considerations", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 114 / 643, 1992.

- [5] Melli, R., Naso, V., Sciubba, E., "Modular Repowering of Power Plants with Nominal Ratings Lower Than 180MW: A Rational Design Approach and Its Application to the Italian Utility System", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 116/201, 1994.
- [6] Heyen, G., Kalitventze, B., "A Comparison of Advanced Thermal Cycles Suitable for Upgrading Existing Power Plant", *Applied Thermal Engineering*, Pergamon, Vol. 19, pp. 227-237, 1997.
- [7] Fränkle, M., "SRS: The Standardized Repowering Solution For 300MW Steam Power Plants In Russia", Siemens Power Generation (PG), 2006.
- [8] Bracco, S., Siri, S., "Exergetic Optimization of Single Level Combined Gasesteam Power Plants Considering Different Objective Functions", ELSEVIER, 2010.
- [۹] حسینی پور، سید مصطفی، و مهرپناهی، عبدالله، «بهبودسازی بازتوانی گرمایش آب تغذیه موازی نیروگاه شهید رجایی براساس هزینه برق تولیدی»، نشریه پژوهشی انجمن مهندسی مکانیک ایران (ISME)، سال سیزدهم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۰.
- [10] Mehrpanahi, A., Hossienalipour, S. M., Mobini, k., "Investigation of the Effects of Repowering Options on Electricity Generation Cost on Iran Steam Power Plants", *International Journal of Sustainable Energy*, DOI:10.1080/14786451, 2011.
- [11] Wołowicz, M., Milewski, J., Badyda, K., "Feedwater Repowering of 800 MW Supercritical Steam Power Plant", *Journal of Power Technologies*, Vol. 92, No. 2, pp. 127-134, 2012.
- [12] Pace, S., Graces11 D. Stenzel, "Strategic Assessment of Repowering", Interim Report, 1997.
- [۱۳] نیکبخت ناصرآباد، صادق، مبینی، کامران، مهرپناهی، عبدالله، علیگودرز، محمدرضا، «بهبودسازی بازتوانی نیروگاه بخار بندرعباس توسط الگوریتم ژنتیک»، مجله پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، پذیرش شده: ۱۳۹۲/۱۲/۲۷، کد مقاله: ۹۲۴۶۳۴.
- [۱۴] سراچی، کاظم، نباتی، حمید، «بررسی ترمودینامیکی تبدیل یک نیروگاه بخار موجود به نیروگاه ترکیبی، هشتمین کنفرانس سالانه انجمن مهندسان مکانیک ایران»، ص ۶۴۹-۶۵۹، تهران، ایران، ۱۳۷۹.
- [15] Nikbakht Naserabad, S., Mobini, K., Mehrpanahi, A., Aligoodarz, M. R., "Exergy-Energy Analysis of Full Repowering of a Steam Power Plant", *Frontiers in Energy*, accepted: 08-May-2014.
- [16] Walters, A. B. "Power Plant Topping Cycle Repowering", *Energy Engineering Journal*, Vol. 5, pp. 49-71, 1995.
- [17] Mehrpanahi, A., Hosseinalipoor, S. M., "Thermoeconomic Analysis of the Existing Options for Feed Water Heating Repowering, Using a Stepwise Method". *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 13-29, 2012.
- [۱۸] متقیان، رضا، قوچانی، محمدتقی، طاهری، محمدجواد، شرکت متن، پروژه طراحی تحقیقاتی نیروگاه بخار SPRD، بخش نیروگاه، ۱۳۷۹.
- [۱۹] صنایع، سپهر، حمزه‌ای، یونس، «مدل‌سازی و بهینه‌سازی فنی، اقتصادی بازسازی نیروگاه‌های بخار با استفاده از توربین‌های گاز»، بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، ۱۳۸۵.
- [20] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., *Thermal Design and Optimization*, New Yourk: John wiley & Sons, 1996.
- [21] EES (Engineering Equation Solver), 2007.
- [۲۲] مهرپناهی عبدالله، حسینی پور، سید مصطفی، سیجانیوندی، سوران، «بهبودسازی چندهدفه بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه موازی یک نیروگاه بخار به وسیله الگوریتم ژنتیک»، نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)، سال چهل و پنج، شماره ۱، ص ۹۳ تا ۱۰۸، تابستان ۱۳۹۲.
- [23] Bassily, A. M., "Enhancing the Efficiency and Power of the Triple-Pressure Reheat Combined Cycle by Means of Gas Reheat, Gas Recuperation, and Reduction of the Irreversibility in the Heat Recovery Steam Generator", *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 1141-1162, 2008.
- [۲۴] حسینی پور، سید مصطفی، مهرپناهی عبدالله، مبینی کامران، «بررسی انجام بازتوانی کامل بر ارتقاء خصوصیات فنی-اقتصادی یک نیروگاه بخار»، ماهنامه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۱ شماره ۱، ص ۱-۱۸، خرداد ۱۳۹۰.
- [25] Kotas, T. J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Butterworths, London, 1985.
- [26] Massardo, A. F., Scialo, M., "Thermoeconomic Analysis of Gas Turbine Based Cycle", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, ASME, pp. 664-671, 2000.
- [27] Dincer, I., Cengel, Y. A., "Energy, Entropy and Exergy Concepts and their Roles in Thermal Engineering", *Entropy*, Vol. 3, pp. 116-49, 2001.
- [28] Jesús, M. Escosa, and Luis, M. Romeo, "Optimizing CO2 Avoided Cost by Means of Repowering", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2351-2358, 2009.
- [۲۹] نیکبخت ناصرآباد، صادق، مبینی، کامران، مهرپناهی، عبدالله، علیگودرز، محمدرضا، «بهبودسازی چند هدفه تبدیل یک نیروگاه بخار قدیمی به سیکل ترکیبی به وسیله الگوریتم ژنتیک»، کنفرانس سراسری مهندسی مکانیک، ایران، شیراز، اسفند ۱۳۹۳.
- [30] Ploumen, P. J., Enema, J. J., Epon, N. V., "Dutch Experience with Hot Windbox Repowering", 96-GT-250, ASME, 1996.
- [31] Tsatsaronis, G., Park M. H., "On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems", In "ECOS'99, Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Envi-ronmental Aspects of Energy Systems, pp. 116-121, Tokyo, Japan, June 8-10, 1999.
- [32] Tsatsaronis, G., "Strengths and Limitations of Exergy Analysis", In *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*, Vol. 69, pp. 93-100, Nato Science, 1999.
- [۳۳] ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱.
- [34] Sayyadi, H., Mehrabipour, R., "Efficiency Enhance Ment of a Gas Turbine Cycle Using an Optimized Tubula Recuperative Heat Exchanger". *Energy journal*, Vol. 38, pp. 362-375, 2012.
- [35] George, T., Cziesla, F., *Thermoeconomics*, Technical University of Berlin, 2000.
- [36] Kudlu, N., "Major Options and Considerations for Repowering with Gas Turbines", BETCHEL Project Report, Electric Power Research (EPRI), project 2565-18, Final Report, 1989.
- [37] Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G., "On the Calcul-Lation of Efficiencies and Costs in Thermal Systems". In *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*, November 1999.
- [38] Penner S. S., Tsatsaronis, G., eds. "Invited Papers on Exergo-Economics", *Energy International Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 279-318, 1994.
- [۳۹] نظام‌الدین فقیه، الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی، ۱۳۸۹.