

# بهینه‌سازی ترمودینامیکی و ترمواکونومیکی نیروگاه سیکل ترکیبی

علی‌رضا صولت‌پور، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

Ali.solatpoor@gmail.com

محسن عبداللهی، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان

Mohsen abdollahi@gmail.com

سیروس آقاجفی، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

aghanajafi@Kntu.ac.ir

## چکیده

نیروگاه سیکل ترکیبی مؤثرترین نوع نیروگاه در بین تمامی نیروگاه‌هاست زیرا علاوه بر بازده و توان بالا از مزایای دیگری همچون انعطاف‌پذیری و راه‌اندازی سریع نیز برخوردار است. در این مقاله نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، شامل بخش‌های گاز و بخار، با نرم‌افزار ایز<sup>1</sup> مورد تحلیل و بهینه‌سازی فنی و اقتصادی قرار گرفته است. معیار ارزیابی در عملیات بهینه‌سازی تابع هدف هزینه کل است که شامل قسمت‌های مربوط به هزینه‌های جاری (بخش ترمودینامیکی) و هزینه‌های سرمایه‌گذاری (بخش اقتصادی) می‌باشد. در این روش ابتدا با استفاده از معادلات بالانس انرژی در اجزای مختلف، مقدار جریان انرژی در خطوط سیستم و میزان انهدام انرژی در هر یک از اجزای سیکل تعیین شده است. در مرحله بعد، با اعمال بالانس هزینه انرژی در هر یک از اجزای سیستم، دستگاه معادلات هزینه انرژی تعیین می‌شود که از حل آن قیمت واحد انرژی در خطوط جریان، هزینه انهدام انرژی در اجزای مختلف سیستم و سایر متغیرهای موردنیاز در تحلیل انرژی - اقتصادی به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه سیکل ترکیبی، تحلیل ترمودینامیکی، بهینه‌سازی ترمواکونومیک، انرژی

## مقدمه

بهینه‌سازی سیکل جهت کاهش هزینه سوخت‌های مصرفی

بسیار مؤثر است [۱]. مهم‌ترین نکته در مورد نیروگاه

سیکل ترکیبی این است که از خروجی معین سیکل

نیروگاه سیکل ترکیبی مؤثرترین نوع نیروگاه در بین

تمامی نیروگاه‌هاست. در این نوع از نیروگاه‌ها، طراحی



نیروگاه گازی بتوانیم بیشترین توان را از سیکل نیروگاه بخاری به دست آوریم. با توجه به اینکه سیکل ترکیبی بازده بیشتری نسبت به سیکل رنکین و برایتون دارد، برای تولید توان نیز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد و به جهت داشتن آلودگی کمتر در دنیا گسترش یافته است. تحلیل آگرژی یک سیستم ترمودینامیکی سبب می‌شود که بتوان میزان اتلافات آگرژی سیستم را برآورد کرد و راندمان مجموعه را محاسبه نمود [۲].

در اینجا منظور از آگرژی، حداکثر کار قابل دسترس سیستم از حالت فعلی به حالت تعادل ترمودینامیکی با محیط اطرافش است [۳].

تحلیل آگرژی سیستم معمولاً ارتباط تنگاتنگی با مشخصات اقتصادی آن دارد، از این رو تحلیل ترمو اقتصادی ابزار مناسبی است که این امکان را فراهم می‌کند تا قیمت واحد محصولات تولیدی را حساب کرده، میزان هزینه تلفات آگرژی و تولید آنتروپی برآورد شود [۲].

تاکنون کارهای زیادی در رابطه با تحلیل ترمو اکونومیک نیروگاه‌های سیکل ترکیبی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به کار داینس<sup>۲</sup> و روزن<sup>۳</sup> اشاره کرد، که در آن به تحلیل انرژی و آگرژی نیروگاه بخار با پیش‌گرمایش برای حالت‌های مختلف راه‌اندازی و دما و فشار بویلر پرداخته شده است [۴]. همچنین احمدی و همکارانش به تحلیل ترمودینامیکی و ترمو اکونومیک نیروگاه سیکل ترکیبی دو شماره نکا پرداخته‌اند [۵]. برزگر نیز یک نیروگاه سیکل ترکیبی را از لحاظ آگرژی و آگرژی‌واکونومیک تحلیل کرده است [۶]. احمدی و همکارانش نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ایران را از لحاظ آگرژی و ترمو اکونومیک نیز بررسی کرده‌اند [۷]. همچنین صیادی و همکارانش راکتور یک

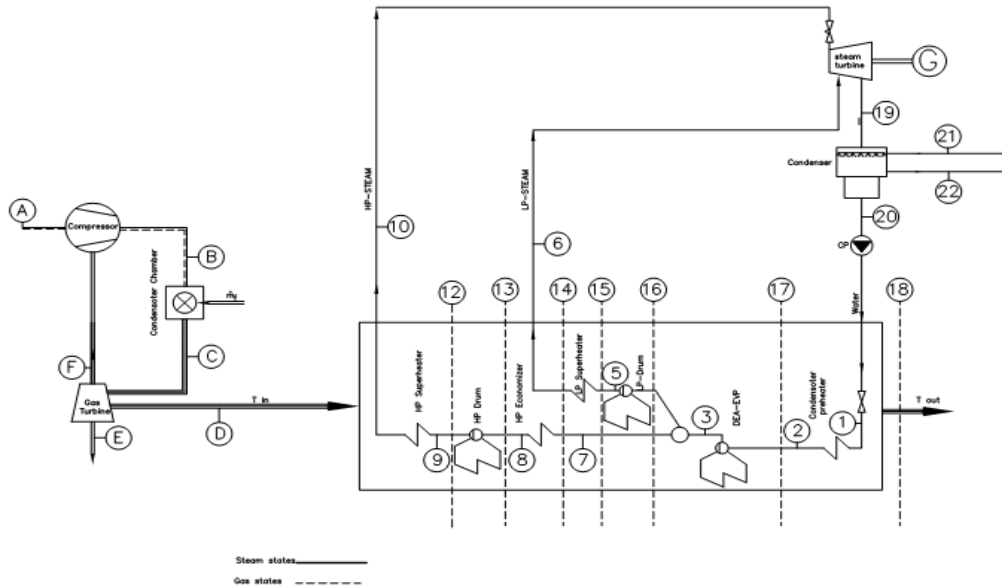
نیروگاه آب سبک را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرده‌اند [۸]. عمیدپور و همکارانش نیز یک نیروگاه هسته‌ای کوپل شده با آب شیرین‌کن را با استفاده از الگوریتم محاسباتی به صورت چندهدفه بهینه‌سازی ترمو اکونومیک کرده‌اند [۹].

بهینه‌سازی سیکل‌های ترمودینامیکی به روش‌های متفاوتی همچون پینچ، آگرژی، پینچ آگرژی و ترمو اکونومیک انجام می‌گیرند که در هر کدام از این روش‌ها متغیرهای متفاوتی می‌تواند به عنوان پارامتر طراحی مدنظر قرار گیرند. در این مقاله از روش بهینه‌سازی ترمو اکونومیک استفاده شده است که پارامترهای طراحی و بهینه‌سازی آن نسبت فشار و راندمان کمپرسور، دمای ورودی به توربین گاز و بخار، فشار کندانسور و غیره می‌باشند. این بهینه‌سازی براساس تابع هدفی مشخص صورت می‌گیرد. این تابع می‌تواند هزینه کل نیروگاه که شامل هزینه خرید تجهیزات، هزینه سوخت مصرفی و تعمیرات باشد. بهینه‌سازی در قالب یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و به منظور کمینه نمودن تابع هدف انجام شود. در این مقاله ابتدا نیروگاه سیکل ترکیبی فارس مورد تحلیل ترمودینامیکی قرار گرفته، سپس ضمن انجام تحلیل آگرژی به کمک الگوریتم ژنتیک و با مدل‌سازی در نرم‌افزار ایز به روش ترمو اکونومیک بهینه‌سازی شده است.

### معرفی نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، که نمای شماتیک آن در شکل ۱ نمایش داده شده است، از شش واحد گازی، هریک با توان ۳/۱۲۱ مگاوات و سه واحد بخار، هرکدام با توان ۲/۹۸ مگاوات تشکیل شده است. لازم به ذکر است که توربین بخار سیکل نیروگاه فارس دوفشاره می‌باشد.





شکل ۱. شماتیک نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

### تحلیل ترمودینامیکی

در این قسمت با توجه به شکل ۱ قانون بقای انرژی نوشته و مقدار آنتالپی، دما و فشار جریان در کل سیکل محاسبه می‌شود.

در رابطه فوق ژتج ارزش حرارتی سوخت، که در اینجا گاز طبیعی است، می‌باشد.  $\eta_{cc}$  راندمان محفظه احتراق است. برای افت فشار محفظه احتراق نیز داریم:

$$\frac{P_c}{P_b} = 1 - \Delta p_{cc}$$

### کمپرسور سیکل گاز

$$T_b = T_a \times \left( 1 + \left( \frac{1}{\eta_{com}} \right) \times \left( r_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right)$$

کار کمپرسور نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_{com} = M_a C_{pa} (T_b - T_a)$$

به طوری که مقدار  $\epsilon_g$  و کاملاً وابسته به دما بوده، از رابطه زیر محاسبه می‌شود،

$$C_{pa}(T) = 1.04841 - \left( \frac{3.8371T}{10^4} \right) + \left( \frac{9.4537T^2}{10^7} \right) - \left( \frac{5.4931T^3}{10^{10}} \right) + \left( \frac{7.9298T^4}{10^{14}} \right)$$

### محفظه احتراق

$$M_a h_b + m_f LHV = M_g h_c + (1 - \eta_{cc}) m_f LHV$$

$$M_g = M_a + m_f$$

### توربین گاز

$$T_d = T_c * \left( 1 - \eta_{gt} * \left( 1 - (rc)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right)$$

که در رابطه فوق  $\eta_{gt}$  راندمان آیزنتروپیک توربین می‌باشد.

$$W_{GT} = M_g C_{pg} (T_c - T_d)$$

به طوری که در این رابطه  $\epsilon_g$  و مقدار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_{pg}(T) = 0.991615 - \left( \frac{6.99703T}{10^5} \right) + \left( \frac{2.7129T^2}{10^7} \right) - \left( \frac{1.224427T^3}{10^{10}} \right)$$

بدین ترتیب برای کار خالص خروجی از توربین داریم،

$$M_{s,HP} + M_{s,LP} = M_s$$

و برای راندمان توربین بخار نیز داریم،

$$\eta_{ST} = \frac{W_{act}}{W_{is}}$$

### کندانسور

$$\dot{M}_s(h_{19} - h_{20}) = \dot{M}_{cooling}(h_{22} - h_{21}) \times \eta_{cond}$$

### پمپ

$$W_{p1} = \frac{M_s(h_1 - h_{20})}{\eta_p}$$

$$W_{BFP,HP} = \frac{M_{s,HP}(h_{out} - h_{in})}{\eta_p}$$

$$W_{BFP,LP} = \frac{M_{s,LP}(h_{out} - h_{in})}{\eta_p}$$

محاسبه راندمان حرارتی سیکل

راندمان حرارتی سیکل گاز

$$\eta_{gas,cycle} = \frac{W_{GT} - W_{com}}{Q_{CC}}$$

راندمان سیکل توربین بخار

$$\eta_{steam,cycle} = \frac{W_{ST} - W_{pump}}{Q_{HRSG}}$$

راندمان سیکل ترکیبی

$$\eta_{CCPP} = \frac{W_{ST} + W_{GT} - W_{com} - W_{pump}}{Q_{in,CCPP}}$$

که در رابطه بالا  $Q_{in,CCPP}$  شامل حرارت انتقالی در محفظه احتراق و حرارت مصرفی در بویلر کمکی (در صورت استفاده) می باشد.

### تحلیل انرژی

در ادامه مقاله برای انجام آنالیز انرژی، مقادیر انرژی تمامی نقاط از جریانها محاسبه می شود. برای محاسبه

$$W_{net} = W_{GT} - W_{com}$$

### مدلسازی حرارتی بویلر بازیاب

بویلر بازیاب از چندین بخش تشکیل شده است که در ادامه به مدلسازی هریک از این بخشها می پردازیم:

#### سوپرهیتر فشار بالا

$$M_g C_p (T_d - T_{12}) = M_{s,HP} (h_{10} - h_9)$$

که در رابطه فوق  $T_d$  دمای بخار ورودی به توربین فشار قوی می باشد.

#### اوپراتور فشار بالا

$$M_g C_p (T_{12} - T_{13}) = M_{s,HP} (h_9 - h_8)$$

#### اکونومیزر فشار بالا

$$M_g C_p (T_{13} - T_{14}) = M_{s,HP} (h_8 - h_7)$$

#### سوپرهیتر فشار پایین

$$M_g C_p (T_{14} - T_{15}) = M_{s,LP} (h_6 - h_5)$$

#### اوپراتور فشار پایین

$$M_g C_p (T_{15} - T_{16}) = M_{s,LP} (h_5 - h_4)$$

#### دی اریتور

$$M_g C_p (T_{16} - T_{17}) = M_{s,LP} (h_3 - h_2)$$

#### پیش گرمکن

$$M_g C_p (T_{17} - T_{18}) = M_{s,LP} (h_2 - h_1)$$

#### توربین بخار

$$(M_{s,HP} h_{10} + M_{s,LP} h_6 - M_s h_{19}) = W_{ST,i}$$

که داریم،



### هزینه‌یابی آگزرژی

برای یک سیستم ترمودینامیکی می‌توان تعدادی جریان جرم و انرژی در ورودی و خروجی به همراه مبادله کار و گرما با محیط در نظر گرفت. این جریان‌های جرم و انرژی، می‌توان جریان‌های آگزرژی به داخل و خارج سیستم هم داشت و به طور همزمان برگشت ناپذیری‌های موجود در سیستم اتلاف آگزرژی هم وجود خواهد داشت. از آن جایی که آگزرژی نشان دهنده ارزش ترمودینامیکی یک جریان است، طبیعی است که هزینه این جریان‌ها را به نرخ انتقال آگزرژی آن مرتبط گردد. به این قسمت ترمواکونومیک، هزینه‌یابی برای آگزرژی می‌گویند. بسته به منشأ، هزینه‌ها را  $\dot{E}$  (برای ورودی) و  $\dot{E}_e$  (برای خروجی) و  $\dot{E}_w$  (برای کار و انتقال گرما نشان داده می‌شود، یعنی،

$$\dot{C}_i = c_i \times \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i \times e_i)$$

$$\dot{C}_e = c_e \times \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e \times e_e)$$

$$\dot{C}_w = c_w \times W$$

$$\dot{C}_q = c_q \times Q$$

که در آن  $\dot{E}$  آگزرژی ورودی بر واحد جرم به سیستم بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم و  $\dot{E}_e$  آگزرژی خروجی بر واحد جرم از سیستم بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم است. هم چنین  $\dot{C}$  دبی جرمی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و  $c$  هزینه‌های متوسط بر واحد آگزرژی است. برای یک جز  $k$  در مجموعه یک سیکل معادله موازنه نرخ هزینه‌ها به صورت زیر است،

$$\sum \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k$$

سمت چپ معادله نشان دهنده هزینه‌های خروجی از جز  $k$  بوده و سمت راست آن نیز نرخ هزینه‌های ورودی را نشان می‌دهند. در معادله بالا  $\dot{C}_{e,k}$  هزینه مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیرات و نگهداری است که با استفاده از مراجع معتبر  $\dot{C}_{e,k}$  قیمت تجهیزات بر حسب

آگزرژی لازم است نسبت به یک حالت مبدا که در اینجا همان شرایط محیطی می‌باشد سنجیده گردد. برای شرایط محیطی دما ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. با دانستن این شرایط و محاسبه مقدار آنتالپی و آنتروپی جریانها با استفاده از تحلیل ترمودینامیکی مقدار آگزرژی هر یک از جریانها از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$e = (h - h_0) - T_0(S - S_0)$$

با نوشتن این رابطه برای تمامی نقاط مورد نظر مقدار آگزرژی تمامی نقاط محاسبه می‌گردد. هم چنین با داشتن مقدار آگزرژی ورودی و خروجی به هر یک از اجزا نیروگاه می‌توان میزان تخریب آگزرژی در هر قسمت را با استفاده از روابط جدول ۱ محاسبه کرد.

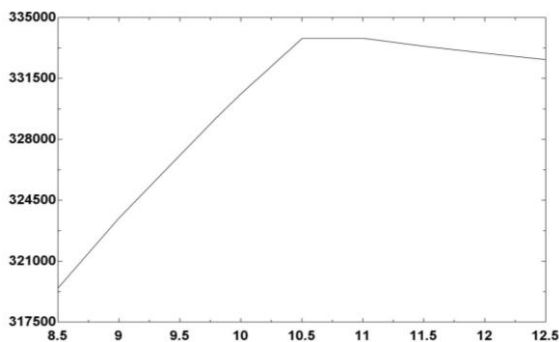
### تحلیل ترمواکونومیک

ترمواکونومیک ترکیبی از تحلیل آگزرژی و اقتصاد است. تحلیل آگزرژی قادر است که انهدام آگزرژی را برآورد کند و برای این کار باید برنامه‌ای تهیه کرد که کل یک سیکل را تحلیل ترمودینامیکی کرده و پس از حل کامل معادلات بقای جرم و انرژی و تعیین خواص مختلف در کلیه گرهای تعریف شده در سیکل به برآورد تلفات آگزرژی بپردازد که این کار جداگانه انجام می‌گیرد، بدین صورت که پس از نوشتن معادلات بقای جرم و انرژی برای کلیه اجزای نیروگاه دستگاه معادلات حاکم با استفاده از روش‌های تکرار عددی حل می‌گردد. البته این قسمت چون امر شناخته شده‌ای است از آوردن آن خودداری شده است پس از برآورد تلفات آگزرژی نکته مهم بعدی دانستن هزینه‌های این تلفات است. به هنگام بحث ترمواکونومیک لازم است که بین هزینه آگزرژی  $\dot{E}$  و نرخ هزینه  $\dot{C}$  (یعنی  $\dot{C} = c \times \dot{E}$ ) تفاوت قائل شویم.

هوا را بر توان تولیدی و تاثیر  $\Delta$  و دبی هوا را بر هزینه مصرفی نشان داده شده است. با توجه با اشکال مذکور می توان محدوده مناسب پارامترهایی نظیر  $\Delta$  و دبی هوا را به دست آورد. بدین ترتیب با توجه به اهداف تعیین شده که افزایش توان خروجی و کاهش هزینه کل بوده است مقادیر هریک از پارامترها برای رسیدن به یک شرایط کارکردی بهینه محاسبه شده است.

### نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی قانون اول و دو ترمودینامیک برای نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به تحلیل ترمودینامیکی و انرژی مبادرت شده است که نتیجه آن تعیین انرژی برای نقاط مختلف سیکل با حل مجموعه دستگاه های چندمعادله چند مجهولی بوده است. حال به کمک این نتایج و نوشتن بالانس هزینه برای تک تک اجزای سیکل مذکور تحلیل ترمواکونومیک شده، که در پایان با داشتن نرخ جریانهای انرژی برای نقاط مختلف سیکل بهینه سازی ترمواکونومیکی انجام شده است. که نتیجه آن یافتن پارامترهای مهم طراحی از جمله نسبت تراکم و دبی هوای کمپرسور و ... برای کمینه نمودن هزینه کل و بیشینه نمودن توان کل خروجی بوده است. این کار برای اولین بار برای نیروگاه سیکل ترکیبی فارس انجام شده است.



شکل ۲. کل توان خروجی بر حسب نسبت تراکم و محل نقطه بیشینه توان

ظرفیتشان به صورت تابعی معلوم به دست آمده و در معادلات منظور میگردد. روش های مختلفی جهت محاسبه  $Z_k$  پیشنهاد شده است ولی آن چه که در این جا مورد استفاده قرار گرفته، روشی است که احمدی و همکارانش  $Z_k$  پیشنهاد داده است و به صورت زیر می باشد

$$Z_k = Z_k \times CRF \times \varphi / (N \times 3600)$$

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

بطوری که  $Z_k$  قیمت به دلار،  $C$  میزان کارکرد سالانه بر حسب ثانیه یا ساعت  $F$  میزان سود بانکی و  $k$  تعداد سال کارکرد است.

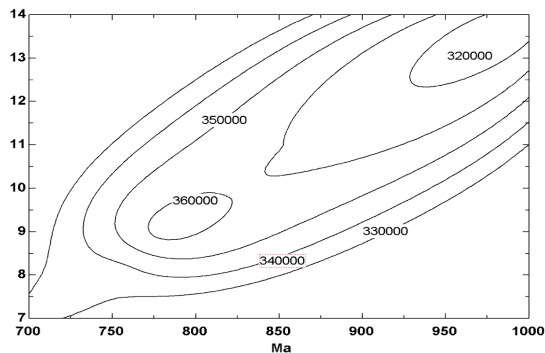
### تحلیل و بهینه سازی ترمواکونومیک

با توجه به مطالب قسمت قبل، سیکل نیروگاه فارس در نرم افزار ایز به صورت کامل شبیه سازی شده است. سپس با در نظر گرفتن پارامترهای بهینه سازی که در جدول ۲ مقادیر این پارامترها در دو حالت بهینه و کنونی ارائه شده اند و همچنین تعریف تابع هدف که هزینه کل اعم از هزینه خرید تجهیزات، هزینه سوخت و هزینه تعمیرات و نگهداری می باشد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی ترمواکونومیک شده است. با توجه به این که الگوریتم ژنتیک قادر به بهینه سازی مسائل به صورت همزمان و بر اساس چندین متغیر می باشد، در این جا نتایج حاصل از بهینه سازی تابع هدف را بر اساس متغیرهای جدول ۲ محاسبه شد، در جدول ۳ ارائه شده است. هم چنین از آن جایی که در یک سیکل نیروگاهی علاوه بر میزان هزینه کل، مقدار توان تولیدی نیز بسیار مورد توجه است، از جمله کارهای مهمی که در این مقاله انجام شده است، انتخاب نسبت تراکم مناسب برای کمپرسور و دبی مناسب هوا به منظور دستیابی به حداکثر توان تولیدی و حداقل هزینه مصرفی است. در اشکال ۳ و ۴ به ترتیب تاثیر مقدار  $\Delta$  و دبی



### تشکر و قدردانی

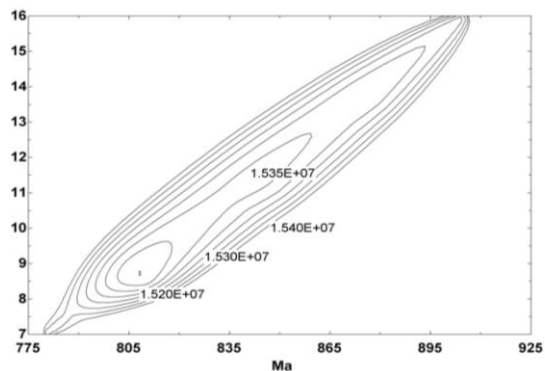
در اینجا لازم می‌دانیم از مدیریت محترم شرکت برق منطقه ای فارس و نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات فنی نیروگاه مذکور، تشکر و قدردانی نمایم.



شکل ۳. کانتور توان خروجی بر حسب نسبت تراکم و دبی هوا (جهت یافتن بیشینه توان)

جدول ۲. مقایسه ارزش اگزرژی نقاط مختلف حالت اولیه و بهینه (دلار بر کیلوژول)

نقاط	حالت اولیه	حالت بهینه
۱	۲۹۵۹۹	۱۲۵۸۹
۱۰	۱۵۵/۸	۱۱۵/۳
۱۹	۱۲۹۸	۱۰۲۴
۲۰	۱۷۱۶۹	۱۰۷۳۷
۶	۲۳۱	۱۹۴/۳
ع	۵/۴۸	۵/۷۳
س	۷/۷	۵/۲۵
ع	۵۷/۵۲	۳۰/۹۷



شکل ۴. کانتور هزینه کل بر حسب نسبت تراکم و دبی هوا جهت یافتن کمینه هزینه

جدول ۱. تخریب اگزرژی و بازده اگزرژی در هر قسمت نیروگاه

Exergy Efficiency	Exergy Destruction	Component
$\eta_{HRSG} = \frac{E_{10} + \dot{E}_6 - E_1}{E_{11} - E_{18}}$	$\dot{E}_{D,HRSG} = \sum_{i,HRSG} \dot{E} - \sum_{o,HRSG} \dot{E}$	ذدث
$\eta_{es} = \frac{\dot{W}_t}{(\dot{E}_{i,T} - \dot{E}_{e,T})}$	$\dot{E}_{D,T} = \sum_{i,T} \dot{E} - \sum_{e,T} \dot{E} - \dot{W}$	مخسک لامرکع نمذ
$\eta_{e,p} = \frac{(\dot{E}_{i,p} - \dot{E}_{o,p})}{\dot{W}_p}$	$\dot{E}_{D,p} = \dot{E}_{i,p} + \dot{W}_p$	گمخ
$\eta_{AC} = \frac{E_2 - E_1}{W_{AC}}$	$E_{D,AC} = E_A - E_B - E_{W,AC}$	لاگ للاگ گب
$\eta_{CC} = \frac{E_C}{E_B + E_{f,cc}}$	$E_{D,CC} = E_B + E_{f,cc} - E_C$	لاگ کعگب فم لمک گب
$\eta_{GT} = \frac{W_{GT}}{E_C - E_D}$	$E_{D,GT} = E_C - E_D - W_{GT}$	غ کف لام راع
$\eta_{DB} = \frac{E_{11}}{E_D + E_{f,DB}}$	$E_{D,DB} = E_D - E_{11} + E_{f,DB}$	لاگ کلام بمع ب
$\eta_{Cond} = 1 - \frac{E_{D,Cond}}{\sum_{in,Cond} E}$	$\dot{E}_{D,C} = \sum_{i,C} \dot{E} - \sum_{e,C} \dot{E}$	لاگ کعگب عک گب

