

## تحلیل انرژی، انرژی، انرژی اگونی و بهبود عملکرد نیروگاه بخار در سه سناریو

محمد امین مجاوری آگاه<sup>1</sup>، خلیل مجاوری آگاه<sup>1</sup>، اشکان عبدالی سوسن<sup>2,3\*</sup>

1-دانشجوی دکتری رشته مهندسی سیستم های انرژی، گروه صنعت و انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2-استادیار گروه صنعت و انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- استادیار گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران

\* صندوق پستی 775/14515، تهران، ایران، [a.abdali@srbiau.ac.ir](mailto:a.abdali@srbiau.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 فروردین 1400

پذیرش: 22 مرداد 1400

ارائه در سایت: 13 آبان 1400

### کلید واژگان

مدلسازی

انرژی

انرژی

انرژی اگونی

نیروگاه حرارتی

اتلاف انرژی

سیکل رانکین

نیروگاههای بخار کنونی طراحی تکامل یافته ای از چرخه بخار - مایع رانکین بوده و نسبت به چرخه ایده آل رانکین شکل بسیار پیچیده تری داشته و در تولید برق کشور تاثیر بسزایی دارند. از اینرو درک مفاهیم پارامترهای تاثیر گذار در افزایش راندمان انرژی و انرژی و انرژی اگونی در طراحی ها بسیار با اهمیت است. یکی از عوامل تاثیر گذار بکار گیری توربین های زیرکش دار است. هدف این پژوهش بررسی سه سناریو اساسی نیروگاه های بخار در مقایسه با طراحی پایه (سیکل رانکین) می باشد تا افزایش بازدهی در نیروگاه ها بررسی و با مقایسه نتایج از منظر انرژی، انرژی و انرژی اگونی، لزوم تحولات لازم در تغییرات طراحی و تاثیر آن بر بازدهی نیروگاه ها مشخص شود. در این راستا از نرم افزار EES برای مدل سازی سه سناریو و نیز بهینه سازی بازدهی انرژی و انرژی سناریو سوم به عنوان مبنای طراحی نیروگاه های مدرن، نسبت به فشار سیال خروجی از زیرکش توربین به هوازدا استفاده خواهد شد. در این تحقیق مشاهده شده است که در سناریو سوم دارای یک توربین با دو زیرکش و تنها یک هوازدا به عنوان پیش گرم کن، بازدهی انرژی و انرژی به ترتیب برابر 20.74% و 26.91% می باشد که نسبت به سناریو دوم با یک زیرکش و بدون هوازدا (پیش گرم کن) سیال ورودی به بویلر، افزایش بازدهی انرژی و انرژی سیستم به ترتیب برابر 19.13% و 9.48% می باشد. تحلیل انرژی اگونی مشخص ساخته است که بویلر و توربین بیشترین نرخ مجموع هزینه سرمایه گذاری، تعمیر و نگهداری و تخریب انرژی را دارد و می باید به این تجهیزات توجه ویژه ای داشت. بالا بودن ضریب هزینه نسبی بویلر ( $r$ ) نشان می دهد که تغییر راندمان بویلر می تواند بهبود کلی هزینه این تجهیز را فراهم آورد و این کار با کاهش تخریب انرژی با پیش گرم کردن و کاهش تلفات و ورود هوای اضافی می تواند انجام گیرد و اینکه ضریب انرژی اگونی  $f_k$  توربین بالا است به معنای آن است که برای کاهش هزینه توربین در هنگام طراحی، امکان کاهش پارامترهای مانند دمای بخار ورودی به توربین، فشار توربین و راندمان باید توجه بیشتری شود.

## Energy, Exergy and Exergy economy Analysis of three Scenario of Thermal Plant

Mohammadamin Mojavery Agah<sup>1</sup>, Khalil Mojavery Agah<sup>1</sup>, Ashkan Abdalisousan<sup>1,2\*</sup>

1- Department of Industry and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Engineering and Technology, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran

\* P.O.B. 14515/775 Teheran, Iran, [a.abdali@srbiau.ac.ir](mailto:a.abdali@srbiau.ac.ir)

### Article Information

Original Research Paper

Received 5 April 2021

### ABSTRACT

Steam power plants are an advanced and complex design of the Rankin steam-liquid cycle and have a significant impact on the country's power generation.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohammadamin Mojavery Agah, Khalil Mojavery Agah, Ashkan Abdalisousan, Energy, Exergy and Exergy economy Analysis of three Scenario of Thermal Plant, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 3, pp. 48-62, 2021 (In Persian)

Accepted 13 August 2021  
Available Online 4 November 2021

**Keywords**

Modeling  
Energy  
Exergy  
Exergy economy  
Steam power plant  
Energy destruction  
Rankin cycle

Therefore, understanding the concepts of effective parameters in increasing energy and exergy efficiency and also exergoeconomic are very important. One of the effective factors is the use of turbine extractions. The purpose of this study is to investigate the three basic scenarios of steam power plants, till the required changes in design and its effects on power plant efficiency to be determined. EES software is used to model three scenarios and also to optimize the energy and exergy efficiencies of the third scenario, as the basis of modern designed power plants, relative to the pressure of turbine extraction to the deaerator. The third scenario has a preheater, a deaerator and two turbine extraction. The second scenario has a turbine extraction and preheater. In third scenario, energy and exergy efficiency are 20.74% and 26.91%, respectively. it's increases of energy and exergy efficiency relative to second scenario are equal to 19.13 and 9.48%, respectively. Exergoeconomic analysis has shown that boiler and turbine have the highest total cost of investment, maintenance and exergy destruction, hence special attention should be paid to this equipment. The high relative cost factor of the boiler (r) indicates that the boiler efficiency can provide an overall improvement in the cost of this equipment. This can be done by reducing the exergy destruction by preheating and reducing losses and use of excess air. The exergoeconomic coefficient of  $f_k$  turbine is high. This means that to reduce the cost of the turbine, the possibility of reducing parameters such as inlet steam temperature, turbine pressure and its efficiency should be given more attention.

قرار دهد [2]. گستردگی تحقیقات در این زمینه تا حدی است که در سال 2017 محققین [3] در فصلی مجزا از کتاب جدید خود، انواع روشهای مدلسازی ترمودینامیکی و انرژی و همچنین روشهای بهینه سازی مختلف سیکل های تولید توان بخار و گازی را معرفی کردند و یک راه موثر برای بهینه سازی سیستم های حرارتی، افزودن خنک کننده های بخار خارجی<sup>1</sup> برای زیرکش<sup>2</sup> توربین با بخار مافوق گرم<sup>3</sup> است [4]. تجزیه و تحلیل انرژی در نیروگاه حرارتی با سوخت زغال سنگ با یک و دو

1- مقدمه

یکی از اصلی ترین عوامل توسعه اقتصادی هر کشور تامین انرژی است که باعث بهبود کیفیت زندگی در آن کشور است [1]. طراحی های مختلف نیروگاه های حرارتی همه در راستای تامین بیشترین برق تولیدی و کمترین هزینه های تولید است و با توجه به اینکه نیروگاه های حرارتی دارای پارامترهای عملیاتی مختلفی هستند لذا لازم است که طراح تاثیر متقابل آنها را از نظر انرژی، انرژی و انرژی اکونومی و همچنین اثرات زیست محیطی مد نظر

جدول 1 معادلات نرخ اتلاف انرژی و بازدهی انرژی برای تجهیزات نیروگاه در سناریو ها

Component	Exergy Destruction	Exergy Efficiency
Boiler	$\dot{E}_{D,B} = \dot{E}_F + \sum \dot{E}_{in,B} - \sum \dot{E}_{out,B}$	$\eta_{ex,B} = (\dot{E}_{out,B} - \dot{E}_{in,B}) / \dot{E}_F$
Steam Turbine	$\dot{E}_{D,T} = \sum \dot{E}_{in,B} - \sum \dot{E}_{out,B} - \dot{W}_T$	$\eta_{ex,T} = \dot{W}_T / (\dot{E}_{out,B} - \dot{E}_{in,B})$
Pump	$\dot{E}_{D,P} = \sum \dot{E}_{in,P} - \sum \dot{E}_{out,P} - \dot{W}_P$	$\eta_{ex,P} = (\dot{E}_{out,P} - \dot{E}_{in,P}) / \dot{W}_P$
Heater	$\dot{E}_{D,H} = \sum \dot{E}_{in,H} - \sum \dot{E}_{out,H}$	$\eta_{ex,H} = \dot{E}_{out,H} / \dot{E}_{in,H}$
Condenser	$\dot{E}_{D,C} = \sum \dot{E}_{in,C} - \sum \dot{E}_{out,C}$	$\eta_{ex,C} = \dot{E}_{out,C} / \dot{E}_{in,C}$
Cycle	$\dot{E}_{Cycle} = \sum \dot{E}_{allcomponent,D}$	$\eta_{ex,T} = \dot{W}_{netout} / \dot{E}_F$

<sup>~</sup> high superheat degree



هزینه های مرتبط را برآورد کند. روابط زیر برای تبدیل این هزینه های محاسبه شده به نرخ های هزینه استفاده می شود [16]:

$$\dot{Z}_k = \frac{CRF \times \varphi_r \times Z_k}{N} \quad (8)$$

$$CRF = \frac{k_i(1+k_i)^{nr}}{(1+k_i)^{nr}-1} \quad (9)$$

که  $\dot{Z}_k$  هزینه سرمایه ای تجهیز  $k$  ام،  $CRF$  فاکتور بازگشت سرمایه،  $\varphi_r$  ضریب تعمیر و نگهداری،  $k_i$  نرخ تنزیل،  $nr$  طول عمر سیستم،  $N$  کل ساعات کارکرد سیستم است.

رابطه بالانس هزینه<sup>2</sup> برای هر تجهیز عبارت است از [16]:

$$\dot{C}_{product} = \dot{C}_{Fuel} + \dot{Z}_{Capital\ investment} + \dot{Z}_{O\&M} \quad (10)$$

نرخ هزینه و متوسط هزینه به ازای هر واحد انرژی<sup>3</sup> عبارت است از

$$\begin{cases} \dot{C}_{product} = \dot{c}_p \times \dot{E}_{product} \\ \dot{C}_{Fuel} = \dot{c}_f \times \dot{E}_{Fuel} \end{cases} \quad (11)$$

$C_p$  unit is dollars per gigajoule (\$/GJ)

در آن  $C_p$  و  $C_f$  هزینه های مخصوص جریان های محصول و سوخت می باشند و برابر دلار بر گیگا ژول<sup>4</sup> است

با محاسبه هزینه سرمایه ای هر تجهیز، معادله بالانس هزینه تجهیز  $k$  ام بدست می آید که بر اساس آن نرخ هزینه جریان های ورودی و جریان های خروجی به صورت زیر قابل محاسبه است: [17]

$$(c\dot{E})_{i,k} + \dot{Z}_k = (c\dot{E})_{e,k} \quad (12)$$

که  $\dot{E}$  نرخ انرژی و  $i, e$  برای نمایش جریان ورودی و خروجی بکار میرود.

هزینه<sup>5</sup> تخریب انرژی تجهیز  $k$  ام (اگر  $\dot{E}_{p,k}$  ثابت باشد) به صورت زیر است:

$$\dot{C}_{D,k} = \dot{C}_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (if \dot{E}_{p,k} = constant) \quad (13)$$

فرض چشم پوشی از انرژی جنبشی و پتانسیل به صورت زیر تعریف میشوند: [16]

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

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

$$\dot{E}x_{heat} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_i ex_i + \dot{i} \quad (3)$$

انرژی خالص انتقالی توسط حرارت  $Q$  در دمای  $T$  با رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\dot{E}x_{heat} = \sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} \quad (4)$$

انرژی کلی جریان از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$ex = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

سپس نرخ انرژی کلی جریان با رابطه زیر محاسبه می شود

$$\dot{E}x = \dot{m} ex = \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0)) \quad (6)$$

بازدهی قانون دوم برای هر تجهیز به صورت زیر بیان می شود:

$$\eta_{ex,k} = \frac{Exergy\ Of\ Product}{Total\ Supplied\ Exergy} = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (7)$$

با استفاده از رابطه های 1 تا 7 و با در نظر گرفتن یک تجهیز از فرآیند سیکل تولید برق به صورت یک حجم کنترل، نرخ اتلاف انرژی و بازدهی انرژی مطابق جدول 1 بدست می آیند. در جدول 1 علاوه بر معادلات بازدهی انرژی، معادلات تخریب انرژی تجهیزات نیز معین شده اند. رابطه بازدهی انرژی سیکل تولید به روش های مختلف می تواند معین گردد ولی در مورد بویلر، معادله مشخص شده نه تنها امکان محاسبه بازگشت ناپذیری انتقال گرمای بخار درون بویلر را شامل می گردد بلکه میزان اتلاف انرژی سوخت احتراق و اتلاف انرژی گاز های خروجی کوره را نیز شامل می شود

## 2-1 تحلیل انرژی اکونومی

تجزیه و تحلیل انرژی اکونومی هر دو جنبه ترمودینامیکی و اقتصادی را در نظر می گیرد تا هزینه کل سیستم مشتمل بر هزینه های سرمایه گذاری<sup>1</sup>، هزینه عملیاتی و نگهداری و سایر

<sup>2</sup> Cost Balance

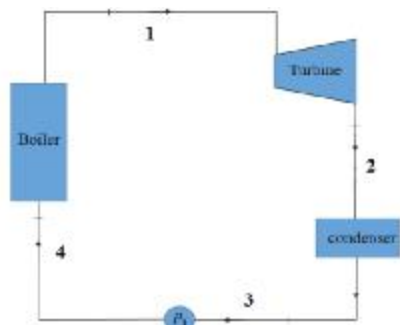
<sup>3</sup> Cost rate and average costs per unit of Exergy

<sup>4</sup>  $C_p$  unit is Dollar per Gigajoule (\$/GJ)

<sup>5</sup> Cost

<sup>1</sup> capital and investment expenses

هر المان در جدول 3 و توان تولید شده و مصرف شده توربین و پمپ در جدول 4 نشان داده شده اند.



شکل 1 نمودار جریان سیستم پایه، سیکل رانکین

جدول 2 مشخصه های ترمودینامیکی نقاط مختلف و تحلیل آگزروی جریان ها در سناریو 1

شماره جریان	آنتروپی kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	آنتالپی kJkg <sup>-1</sup>	دبی جرمی kg s <sup>-1</sup>	دما C	فشار kPa	آگزروی kJkg <sup>-1</sup>
1	6.769	3213	100	400	4000	1357
2	6.958	2765	100	143.6	400	851.6
3	1.777	604.9	100	143.6	400	236.5
4	1.777	609	100	144.1	4000	240.5

جدول 3 مقادیر آگزروی، تخریب آگزروی و راندمان آگزروی هر المان در سناریو 1

نام تجهیز	آگزروی FUEL KJKG <sup>-1</sup>	آگزروی PRODUCT KJKG <sup>-1</sup>	تخریب آگزروی KJKG <sup>-1</sup>	راندمان آگزروی %	راندمان انرژی %
سیکل			76845	0.2433	0.1723
بویلر	182789	111624	71166	0.6107	-
توربین	50515	44876	5639	0.8884	0.85
کندانسور	85159	23655	25.71	0.9997	-
پمپ	410.2	395.6	14.66	0.9643	0.95

توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ در این سناریو در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4 توان تولیدی و مصرفی توربین و پمپ در سناریو 1

نام تجهیز	W KJ/S
توربین	44876
پمپ	410.2

اختلاف قیمت نسبی<sup>1</sup> ( $r_k$ ) و ضریب آگزروی اکونومی<sup>2</sup> ( $f_k$ ) تجهیز K ام به صورت زیر ارائه می شود [17]:

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} \quad (14)$$

اختلاف قیمت نسبی، پارامتری است که اختلاف میانگین قیمت تمام شده محصولات و سوخت ها را نشان می دهد که ناشی از تخریب آگزروی و هزینه سرمایه گذاری است. [17]

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{D,k}} \quad (15)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{Fuel} \times (\dot{E}_{Destruction} + \dot{E}_{loss})} \quad (16)$$

در رابطه بالا داریم:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_{CI} + \dot{Z}_{O\&M} \quad (17)$$

ضریب آگزروی اکونومی، عامل مهمی است و به نقش هزینه اولیه و نیز هزینه های تلفات و تخریب انرژی در هزینه محصول می پردازد و به عبارتی نشانگر اهمیت نسبی قیمت یک تجهیز به هزینه سرمایه گذاری و هزینه تخریب آگزروی مرتبط با آن تجهیز است. در حالت بهینه سازی باید  $r_k$  حداقل باشد.

### 1- مدل سازی سناریو اول (سناریو پایه): سیکل رانکین

#### توضیح فرآیند:

با توجه به شکل 1، سیال یا آب در بویلر حرارت دیده و در دما و فشار بالا خارج می شود (جریان 1) و سپس در توربین منبسط شده و دما و فشار آن کاهش می یابد (جریان 2). این سیال در ادامه مسیر با فشار و دمای پایین تر به سمت کندانسور (چگالنده) هدایت می شود و در کندانسور حرارت از دست داده و به صورت اشباع به سمت پمپ می رود (جریان 3)، پمپ فشار سیال را افزایش داده و به سمت بویلر هدایت می کند (جریان 4).

مشخصات سیستم که بر اساس آن مدل سازی انجام گرفته است عبارتند از:

$$P_1 = 4 \text{ MPa}, T_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}, P_3 = 400 \text{ Pa},$$

$$P_{\text{Condenser}} = 400 \text{ kPa}, P_{\text{Ref}} = 1.013 \text{ bar}$$

$$\eta_{\text{Turbine}} = 0.85, \eta_{\text{Pump}} = 0.95$$

بر اساس معادلات بالانس و راندمان آگزروی و محاسبات انجام شده در EES، مشخصه های ترمودینامیکی و تحلیل آگزروی جریانها در جدول 2 و مقادیر آگزروی، تخریب و راندمان آگزروی

<sup>1</sup> Relative cost difference

<sup>2</sup> Exergoeconomic Factor

بر اساس محاسبات، توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ به ترتیب برابر  $44876 \text{ W KJ/s}$  و  $410.2 \text{ W KJ/s}$  و مقادیر Q-cooling کندانسور برابر  $2159.73 \text{ KJ/Kg-k}$  و Q-heating بویلر برابر  $260439 \text{ KJ/Kg-k}$  محاسبه شده است.

بر اساس محاسبات، توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ به ترتیب برابر  $44876 \text{ W KJ/s}$  و  $410.2 \text{ W KJ/s}$  و مقادیر Q-cooling کندانسور برابر  $2159.73 \text{ KJ/Kg-k}$  و Q-heating بویلر برابر  $260439 \text{ KJ/Kg-k}$  محاسبه شده است.

جدول 5 مشخصه های ترمودینامیکی نقاط مختلف و تحلیل انرژی جریان ها در سناریو 2

شماره جریان	آنتروپی $\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	انتالپی $\text{kJkg}^{-1}$	دبی جرمی $\text{kgs}^{-1}$	دما C	فشار kPa	انرژی $\text{kJkg}^{-1}$
1	6.769	3213	100	400	4000	1357
2	7.605	3150	100	151.9	400	1044
3	1.777	604.9	100	143.6	400	236.5
4	1.777	609	100	144.1	4000	240.5
5	6.894	2877	100	170.4	800	982.7
6	7.571	3267	100	400	800	1171

جدول 6 مقادیر انرژی، تخریب انرژی و راندمان انرژی هر المان در سناریو 2

نام تجهیز	انرژی $\text{kJkg}^{-1}$	انرژی $\text{kJkg}^{-1}$	تخریب انرژی $\text{kJkg}^{-1}$	راندمان انرژی %	راندمان انرژی %
سیکل			84233	0.2458	0.1741
بویلر	182789	111624	71166	0.6107	-
توربین	50065	45341	4724	0.9056	0.85
کندانسور	104443	23655	8329	0.9203	-
پمپ	410.2	395.6	14.66	0.9643	0.95

مقادیر کل توان تولیدی توربین و هر طبقه توربین به همراه توان مصرفی پمپ در جدول 7 نشان داده شده است

جدول 7 توان تولیدی و مصرفی توربین و پمپ در سناریو 2

نام تجهیز	KJ/S
توربین	45341
پمپ	410.2

بر اساس محاسبات، مقادیر Q-cooling کندانسور برابر  $260439 \text{ KJ/Kg-k}$  و Q-heating بویلر برابر  $254552 \text{ KJ/Kg-k}$  است.

## 2- مدل سازی سناریو دوم: توربین با زیرکش و بازگرمایش

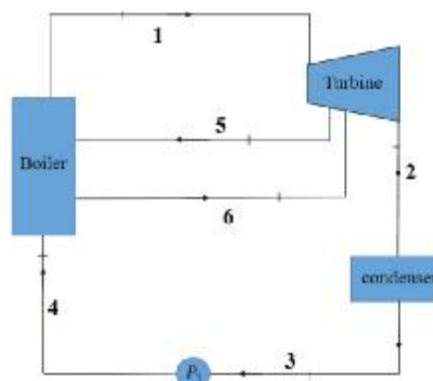
در این سناریو با در نظر گرفتن شماتیک سناریو پایه و در نظر گرفتن یک توربین زیرکش دار که خروجی زیر کش آن از یک ری هیت<sup>1</sup> می گذرد به عنوان سناریو 2 جهت بررسی در نظر گرفته شده است (شکل 2)

### توضیح فرآیند:

در نقطه 5 سیال خروجی از توربین وارد بویلر می شود تا یک بازگرمایش (ری هیت) در آن انجام گیرد و از طریق خط 6 مجدداً وارد توربین می شود. در واقع در این سیستم دو طبقه<sup>2</sup> توربین وجود دارد که در آن سیال ورودی خط 1 از خط 5 خارج و از طریق خط 6 وارد توربین می شود. از نظر مهندسی هدف آن است که کیفیت خط 2 افزایش یابد چون اگر طراحی به گونه ای باشد که کیفیت خروجی توربین افت نماید باعث آسیب رسیدن به توربین می شود.

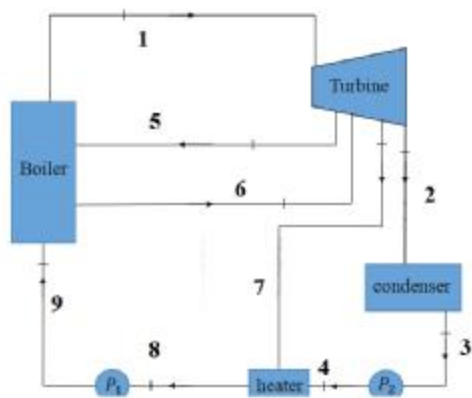
مشخصات سیستم که بر اساس آن مدل سازی انجام گرفته است عبارتند از:

$$P_1=4\text{MPa}, T_1=400\text{C}^0, P_3=10\text{kPa}, P_5=400\text{kPa}, T_6=400\text{C}^0, P_{ref}=1.013\text{ bar}, \eta_{Turbine}=0.85, \eta_{Pump}=0.95$$



شکل 2 نمودار جریان سیستم توربین با زیرکش و بازگرمایش (ری هیت)

<sup>1</sup> Reheat  
<sup>2</sup> Stage



شکل 3 نمودار جریان سیستم توربین با زیرکش، بازگرمایش (ری هیت) و هیتر

بر اساس معادلات بالانس و راندمان انرژی و محاسبات انجام شده در EES، مشخصه های ترمودینامیکی و تحلیل انرژی جریانها در جدول 8 و مقادیر انرژی، تخریب انرژی و راندمان انرژی هر تجهیز در جدول 9 نشان داده شده اند.

جدول 8 مقادیر انرژی، تخریب انرژی و راندمان انرژی جریانها در سناریو 3

شماره جریان	آنتروپی $\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	آنتالپی $\text{kJkg}^{-1}$	دبی جرمی $\text{kgs}^{-1}$	دما C	فشار kPa	انرژی $\text{kJkg}^{-1}$
1	6.769	3213	100	400	4000	1357
2	7.605	3150	85	151.9	500	1044
3	1.777	604.9	85	143.6	400	236.5
4	1.777	605.1	85	143.7	600	236.8
5	6.894	2877	100	170.4	800	982.7
6	7.571	3267	100	400	800	1171
7	7.592	3194	15	158.9	600	1092
8	2.679	993.5	100	158.9	600	356.3
9	2.682	1028	100	231.9	4000	390

با توجه به جداول 3 و 6، بازدهی انرژی و انرژی سیکل در سناریو اول و دوم تغییرات چندانی ندارد. در سناریو دوم کیفیت بخار خروجی از توربین افزایش داشته و با توجه به جداول 4 و 7 توان تولیدی توربین<sup>1</sup> افزایش می یابد و از آنجا که کیفیت بخار خروجی توربین مقدار قابل توجهی است همچنان می توان از این بخار استفاده نمود تا با بازیابی در بخش هیتر، بازدهی انرژی و انرژی بیشتری برای کل سیکل بدست آید به عبارتی دیگر منطق مهندسی حکم مینماید که بخار با چنین کیفیت بالایی را هدایت کرده تا با پیش گرمایش، مقدار سوخت مصرفی در بویلر کاهش یابد و چنین منبع انرژی دما بالایی را بدون گرفتن تمامی کار مفید از آن (انرژی) تلف ننمود، بنابراین به صورت سناریو 3 بکار گرفته خواهد شد.

### 3- مدلسازی سناریو سوم: توربین با زیرکش، بازگرمایش و دی اریاتور

این سناریو با در نظر گرفتن شماتیک سناریو 2 و تکمیل طراحی و در نظر گرفتن زیرکش دوم و هدایت آن به یک دی اریاتور به عنوان سناریو 3 جهت بررسی در نظر گرفته شده است (شکل 3)

#### توضیح فرآیند:

در ادامه توضیح فرآیندی شکل 2، سیال خروجی کندانسور حرارت از دست داده و به صورت اشباع به سمت پمپ 2 میرود (جریان 3)، خروجی پمپ مذکور (جریان 4) با خط 7 که یک خروجی از زیرکش توربین به سمت دی اریاتور است، تبادل حرارتی خواهد داشت. این تبادل حرارتی که از خط 7 به خط 4 انجام می گیرد در جریان 8 وجود داشته و نقش پیش گرمایش سیال ورودی به پمپ 1 و به صورت جریان 9 به بویلر وارد می شود.

مشخصات سیستم عبارتند از:

$$P1=4\text{MPa}, T1=400\text{C}, P5=400\text{kPa}, T6=400\text{C}, P7=100\text{kPa}, p2=10\text{kPa}, \eta_{\text{Turbine}}=0.85, \eta_{\text{Pump}}=0.95$$

<sup>1</sup>  $W_{\text{tur}}$



جدول 9 مقادیر انرژی، تخریب انرژی و راندمان انرژی هر المان در سناریو 3

نام تجهیز	انرژی Fuel kJkg <sup>-1</sup>	انرژی Product kJkg <sup>-1</sup>	تخریب انرژی kJkg <sup>-1</sup>	راندمان انرژی %	راندمان انرژی %
سیکل			80761	0.2691	0.2074
بویلر	153440	96719	56721	0.6304	-
توربین	50065	45341	4724	0.9056	0.85
کندانسور	104443	23655	19198	0.8162	-
پمپ - کل	4044	3926	118.1	0.9708	0.95
پمپ 1	9.694	9.348	0.3467	0.9642	-
پمپ 2	4034	3916	117.7	0.9708	-
Deaer at or	92327	35038	57288	0.3795	-

مقادیر کل توان تولیدی توربین به همراه توان مصرفی پمپ ها در جدول 10 نشان داده شده است.

جدول 10 توان تولیدی و مصرفی توربین و پمپ ها در سناریو 3

نام تجهیز	W KJ/s
توربین	41623
پمپ - کل	4044
پمپ 1	9.694
پمپ 2	4034

جدول 11 افزایش راندمان انرژی و انرژی سیکل در سناریو 3 نسبت به سناریو 2 را نشان می دهد.

جدول 11 افزایش راندمان انرژی و انرژی سیکل در سناریو 3 نسبت به سناریو 2

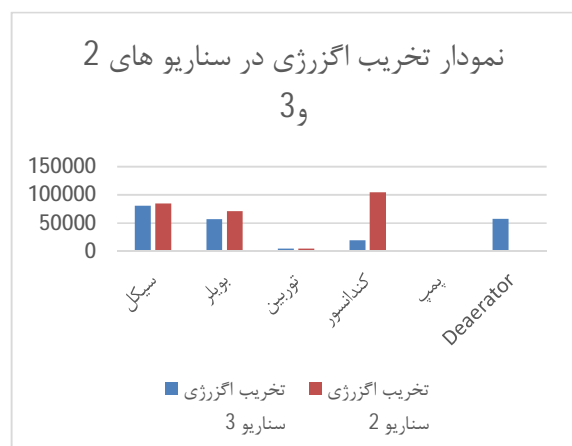
افزایش راندمان انرژی (%)	افزایش راندمان انرژی (%)
19.12694	9.479251

#### 4- تحلیل انرژی

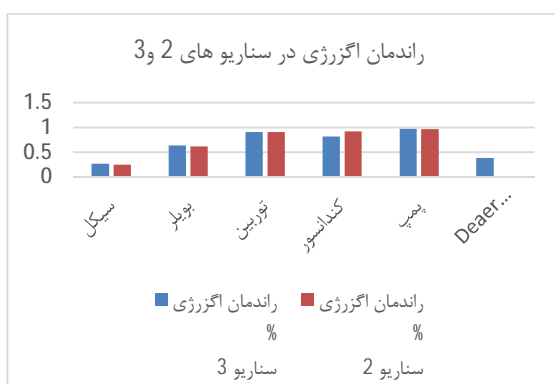
با توجه به جداول 3 و 6 و 9، در سناریو اول بازدهی انرژی و انرژی سیکل به ترتیب برابر 0.1723 و 0.2433 و در سناریو دوم به ترتیب 0.1741 و 0.2458 محاسبه شده است که با اضافه شدن ری هیت یک افزایش جزئی در بازدهی انرژی و انرژی سیکل بدست آمد. در سناریو سوم با

افزایش دی اریاتور، پیش گرم کردن سیال ورودی به بویلر بیشتر شده است، بازدهی انرژی و انرژی سیکل در این سناریو به ترتیب برابر 0.2074 و 0.2691 می باشد که بر اساس جدول 11 نسبت به سناریو دوم افزایش بازدهی انرژی و انرژی به ترتیب برابر 19.12% و 9.47% بوده است.

نمودارهای شکل 4 و 5 وضعیت تخریب انرژی و راندمان انرژی در کل سیکل و در اجزا سناریو 2 و 3 را نشان می دهد. مشاهده می شود که تخریب انرژی در سیکل سناریو سوم کمتر و بازدهی انرژی کمی بیشتر است.



شکل 4 نمودار تخریب انرژی در سناریو های 2 و 3



شکل 5 نمودار راندمان انرژی در سناریو های 2 و 3



حداکثر بازدهی انرژی بعد از 31 تکرار به مقدار 0,4114 به ازای  $P[7]=100\text{kPa}$  می رسد. به عبارتی اگر از خروجی زیرکش دوم به هوازدا بخاری با فشار 100kPa دریافت شود در حالیکه فشار کندانسور 500Kpa باشد، ماکزیمم بازدهی انرژی بدست می آید. در حالت فوق جریان ورودی به توربین برابر 100kg/s در نظر گرفته شده است.

## 6- تحلیل ترمو اکونومی

### 7-1 اهداف تحلیل انرژی اکونومی

اهداف تحلیل انرژی اکونومی عبارتند از:

- محاسبه هزینه محصول های تولیدی یک سیستم
- درک فرآیند هزینه تشکیل و جریان هزینه های سیستم
- بهینه سازی متغیرهای خاص در یک تجهیز
- بهینه سازی کل سیستم

### 7-2 اطلاعات مورد نیاز در تحلیل ترمو اکونومی

برای تحلیل ترمو اکونومی سه دسته اطلاعات لازم است:

- 1- نرخ انرژی که از مرحله تحلیل انرژی بدست می آید.
- 2- هزینه های جریان های<sup>1</sup> ورودی به سیستم مانند بخار، آب، هوا و غیره
- 3- هزینه سرمایه گذاری، هزینه عملیاتی و تعمیر نگهداری که به صورت همتراز شده<sup>2</sup> تعیین شده باشد

با توجه به معادلات 8 تا 17 که در بخش 3-1 تحلیل انرژی اکونومی، توضیحات آن آمده است و به کمک معادلات کمکی، طی مراحل زیر محاسبات انجام شده است:

مرحله اول تعیین جریان های انرژی

مرحله دوم: تعریف سوخت<sup>3</sup> و محصول<sup>4</sup>

مرحله سوم: حل معادلات هزینه

قبلا بیان شد که بخار مناسب و با کیفیت بالا از خروجی توربین در سناریوهای اول و دوم بهتر است که مستقیماً به کندانسور هدایت نشود، چون این بخار با کیفیت بالا می تواند پتانسیل تولید برق بیشتری را فراهم آورد لذا در طراحی سناریو سوم از یک پیش گرم کن Deaerator استفاده شده است. به همین دلیل در طراحی هایی پیشرفته تر قابل توجه است که خروجی زیر کش های مختلف توربین به پیش گرم کن های بیشتری ارسال می شود.

با وجود بهبود میزان تخریب انرژی بویلر در سناریو سوم، ولی همانگونه که مشاهده می گردد در سناریو 3 سهم بالای تخریب انرژی در بویلر می باشد که مربوط به بازگشت ناپذیرهای غیرقابل دسترس می باشد. لذا توجه در بکارگیری تعداد بیشتری هیتر آب تغذیه برای کاهش بازگشت ناپذیری آنها دارای اهمیت می باشد.

در جمع بندی موضوع می توان گفت که سناریو اول به دلیل عدم بکارگیری هیترهای آب تغذیه و نیز عدم استفاده از توربین زیرکش دار به هیچ عنوان انعطاف پذیری نداشته و با این شکل طراحی، منطقی است که کاربردی در نیروگاه ندارد.

سناریو دوم با یک زیرکش و به جهت افزایش گرمای بخار خروجی از زیرکش و ورود مجدد به توربین نسبت به سناریو اول انعطاف پذیر تر است.

سناریو سوم به جهت بکارگیری خروجی زیرکش در گرمایش آب تغذیه ورودی به بویلر، انعطاف پذیری بیشتری نسبت به سناریو دوم دارد لذا راهکار قابل قبولی در ارتقاء توان و بازده نیروگاه های بخار خواهد داشت. مشخصات برتر این سناریو در بکارگیری دی اریتر عبارتند از:

- 1- به تغییرات اساسی در نیروگاه نیازی نیست.
- 2- هزینه سرمایه گذاری در این سناریو نسبتاً پایین است.
- 3- نیروگاه با بکارگیری زیرکش های بیشتر جهت گرمایش بیشتر آب ورودی در مسیر بویلر انعطاف پذیری بالایی دارد.

## 5- بهینه سازی بازدهی انرژی

با توجه به اینکه سناریو 3 می تواند مبنای طراحی بسیاری از نیروگاه ها قرار گیرد بهینه سازی بازدهی انرژی آن در EES انجام گرفت. یکی از عوامل مهم در بازدهی، فشار  $P_7$  است، در مورد اینکه فشار  $P_7$  که به پیش گرمکن هوازدا می رود چقدر باشد و اینکه آیا این بهترین فشاری است که به آن می رود و به عبارت دیگر به ازای چه فشاری از  $P_7$ ، بازدهی انرژی ماکزیمم خواهد بود، بهینه سازی انجام گرفت. نتایج نشان داد که

<sup>1</sup> Stream

<sup>2</sup> leveled

<sup>3</sup> fuel

<sup>4</sup> product

در واقع معادلات مورد نیاز برای تجهیزات به صورت زیر می باشند:

- 1- معادله هزینه سوخت و محصول برای تجهیز
- 2- معادله بالانس هزینه برای تجهیز
- 3- معادله کمکی برای تجهیز
- 4- تخمین هزینه اولیه تجهیزات

با توجه به تغییر هزینه ها به صورت سالانه، جهت ارزیابی طراحی یک سیستم حرارتی از نقطه نظر هزینه ای، از روش همتراز شده استفاده شده است، لذا ضریب بازگشت سرمایه<sup>1</sup> نیز با توجه به عمر آن تجهیز و در نظر گرفتن نرخ تنزیل محاسبه می شود. پارامترهای اقتصادی مورد نیاز برای ارزیابی انرژی اکونومی سناریو های پیشنهادی در جدول 12 آمده است

جدول 12 پارامترهای اقتصادی مورد نیاز برای ارزیابی انرژی اکونومی سناریو های پیشنهادی

ساعات کارکرد سالانه (ساعت)	8000
عمر قابل انتظار تجهیزات (سال)	20
ضریب تعمیر و نگهداری	1.06
نرخ تنزیل	0.15

پارامترهای مهم دیگر ترمواکونومیک عبارتند از هزینه تخریب انرژی<sup>2</sup>، اختلاف قیمت نسبی<sup>3</sup> ( $f_k$ ) و ضریب انرژی اکونومی<sup>4</sup> ( $f_k$ ) که برای هر تجهیز محاسبه شده است.

### 3-7 پارامترهای ارزیابی ترمواکونومیک

پس از محاسبه پارامترها و متغیرهای ترمواکونومیک، برای ارزیابی ترمواکونومیک باید مراحل زیر طی شود:

- 1- محاسبه مجموع هزینه اولیه و هزینه تخریب  $Z + C_D$  هر تجهیز، که اهمیت آن تجهیز را از نظر هزینه ای در سیستم نشان می دهد.

2- سپس مجموع هزینه اولیه و هزینه تخریب به صورت نزولی Descending مرتب می شوند. تا در طراحی تجهیزات که این مقدار در آنها بیشتر است، تجدید نظر شود.

3- در سیستم هایی که این هزینه برای تجهیزات زیاد است توجه به ضریب  $r_k$  های بالا (اختلاف هزینه نسبی) اهمیت دارد. و هر قدر مقدار آن کمتر شود یعنی هزینه نهایی محصول نسبت به سوخت مصرفی کمتر است و در نتیجه تجهیز از نظر اقتصادی بهتر طراحی شده است.

4- برای تعیین منبع هزینه اصلی تجهیز (یعنی هزینه اولیه و یا هزینه تخریب انرژی) به ضریب انرژی اکونومی  $f_k$  توجه شود، اگر  $f_k$  زیاد باشد به معنای تاثیر زیاد هزینه اولیه آن تجهیز است که باید تا حد ممکن کاهش یابد و اگر  $f_k$  کم باشد به معنای راندمان کم آن تجهیز به جهت هزینه زیاد تخریب انرژی است و در نتیجه باید راندمان آن تجهیز افزایش یابد. بنابراین بین هزینه و راندمان تجهیز باید یک توازن برقرار باشد.

البته کارهای دیگری به شرح زیر است که برای بهبود اقتصادی سیستم میتوان انجام داد:

5- حذف زیر فرآیندهایی که تخریب انرژی و تلفات انرژی را زیاد می کنند بدون آنکه روی هزینه اولیه و یا هزینه سوخت سایر تجهیزات موثر نباشد.

6- به تجهیزاتی که نسبتا بازدهی انرژی کمتری داشته و یا نسبتا نرخ تخریب انرژی بالای دارند و یا نسبت تخریب انرژی یا نسبت تلفات انرژی<sup>5</sup> بالای دارند توجه بیشتری شود تا بازدهی انرژی آنها بهبود یابد.

### 4-7 ارزیابی ترمواکونومیک سناریو 1، سناریو پایه

با در نظر گرفتن نمودار جریان سیستم پایه، شکل 1 سیکل رانکین در سناریو 1، محاسبات انرژی اکونومی در EES انجام و نتایج محاسبات (مرتب شده بر اساس  $Z\_Total(\$/h)$ ) در جدول 13 مشاهده می شود.

<sup>5</sup> rate of exergy destruction, the exergy destruction ratio, or the exergy loss ratio

<sup>1</sup> CRF

<sup>2</sup> Cost of exergy destruction

<sup>3</sup> Relative cost difference

<sup>4</sup> Exergoeconomic Factor

مجموع هزینه خرید و تخریب آگزرژی به صورت یک متغیر  $(Z\_Total)$  جهت ارزیابی اکونومی هر تجهیز و به صورت مجموع هزینه اولیه و تعمیر و نگهداری  $Z_k$  و نیز هزینه تخریب آگزرژی به صورت  $C_D$  در محاسبات در نظر گرفته می شود. در مورد بویلر  $Z\_Total$  شامل سوخت مصرفی نیز خواهد بود.

مقادیر آگزرژی هر تجهیز، راندمان آگزرژی  $(\epsilon)$ ، میزان تخریب آگزرژی  $E_D$ ، نسبت تخریب آگزرژی  $(y_D)$  هر تجهیز تعیین و سپس در مرحله تحلیل ترموآکونومیک و با روابط آگزرژی اکونومی ضرایب سوخت  $C_f$  و محصول  $C_p$ ، مشخص گردید تا از این طریق هزینه تخریب آگزرژی تجهیزات  $C_D$  بدست آید و سپس با استفاده از هزینه اولیه هر تجهیز، مقدار مجموع هزینه اولیه و هزینه تخریب  $Z_k + C_D$  برای هر تجهیز محاسبه شد و سپس این مجموع هزینه اولیه و هزینه تخریب مرتب سازی شد.

مقادیر سه ستون  $(Z\_Total)$ ، ضریب آگزرژی اکونومی  $f$ ، (اختلاف هزینه نسبی)  $r$  در جدول 13 مشخص است. با توجه به مرتب سازی ستون  $(Z\_Total)$ ، مشخص است بیشترین هزینه  $\$/kW$  در بویلر است که بیشتر ناشی از سوخت مصرفی است و بعد از آن بیشترین هزینه مربوط به توربین بخار و سپس کندانسور و در انتها مربوط به پمپ است. با توجه به کم بودن ضریب آگزرژی اکونومی بویلر  $f$ ، می توان متوجه شد که راندمان بویلر تا حدودی پایین است. بنابراین انتظار می رود که با بهبود راندمان بویلر، راندمان سیستم افزایش یابد. البته در تجهیزاتی که در آنها احتراق صورت می گیرد به جهت وجود تخریب آگزرژی، اصولاً راندمان پایین است.

در عین حال با انجام فرآیند یاد شده مشاهده می شود که بویلر و توربین دو تجهیز هی هستند که بیشترین اهمیت هزینه ای را دارند و باید به آنها توجه ویژه ای شود. اگر به ضریب آگزرژی اکونومی  $f_k$  بویلر توجه شود مشاهده می گردد که مقدار کمی داشته و بنابراین تخریب آگزرژی اثر زیادی در هزینه دارد و بنابراین تخریب آگزرژی را باید کاهش داد و در بویلر با کاهش تخریب آگزرژی با پیش گرم کردن و کاهش تلفات و ورود (هوای اضافی)، تخریب آگزرژی را می توان کاهش داد اما این تاثیرات

ناچیز خواهد بود اما اگر به ضریب آگزرژی اکونومی  $f_k$  توربین توجه شود مقدار آن نسبتاً بالا است که به معنای هزینه اولیه بالای توربین است که این هزینه توربین به پارامترهای مختلفی مانند دمای بخار ورودی به توربین، فشار توربین و راندمان آن بستگی دارد. بنابراین برای کاهش هزینه توربین باید یک یا چند پارامتر توربین کاهش یابد. تجهیز بعدی پمپ است که با توجه به ضریب آگزرژی اکونومی آن به معنای قیمت یا هزینه اولیه زیاد آن است. ضریب هزینه نسبی آن  $(r)$  در بین سایر تجهیزات نسبتاً زیاد بوده که تحت تأثیر پارامترهای مانند نسبت فشار پمپ و راندمان آن است و امکان بهبود کلی هزینه آن فراهم می شود.

#### 5-7 ارزیابی ترموآکونومیک سناریو دوم: توربین با زیرکش و بازگرمایش

با در نظر گرفتن نمودار جریان سیستم توربین با زیرکش و بازگرمایش در سناریو 2، شکل 2، محاسبات آگزرژی اکونومی در EES انجام و نتایج محاسبات (مرتب شده بر اساس  $Z\_Total$  در جدول 14 مشاهده می شود).

با توجه به مرتب سازی ستون  $(Z\_Total)$ ، مشخص است بیشترین هزینه  $\$/kW$  در بویلر است که بیشتر ناشی از سوخت مصرفی است، از طرفی بالا بودن ضریب هزینه نسبی بویلر  $(r)$  نشان می دهد پارامترهایی مانند فشار کاری و راندمان بویلر امکان بهبود کلی هزینه آن فراهم می آورد. در این سناریو، کم بودن ضریب آگزرژی اکونومی بویلر  $f$ ، نشان می دهد که راندمان بویلر تا حدودی پایین است. بنابراین با بهبود راندمان بویلر، انتظار می رود که راندمان سیستم افزایش یابد.

در جدول 14 بالا بودن هزینه اولیه توربین توجه را به خود جلب نموده ولی با توجه به کم بودن ضرایب  $f, r$  هزینه توربین متناسب با پارامترهای مانند دمای بخار ورودی به توربین، فشار توربین و راندمان مناسب است.

#### 6-7 ارزیابی ترموآکونومیک سناریو سوم: توربین با زیرکش، بازگرمایش و هوازا

جدول 13 پارامترهای انرژی اگزرژی اکونومی برای سناریو 1 (پایه)

اشکان عبدالی سوسن و همکاران

تحلیل انرژی، اگزرژی، اگزرژی اکونومی و بهبود عملکرد نیروگاه بخار در سه سناریو

	Exergy Eff. (%)	$E_D$ (MW)	$Y_D$ (%)	$C_F$ (\$/KJ)	$C_P$ (\$/KJ)	$C_D$ (\$/h)	Z Total(\$/h)	r (%)	f (%)
Boiler	0.6107	71166	92.60935	0.000003	0.000005387	768.6	3466.404	79.55	19.86
Turbine	0.8884	5639	7.338113	0.00001282	0.00001539	260.352	414.072	19.99	37.13
Condenser	0.9997	25.71	0.033457	0.00004781	0.00001282	1.18692	140.72292	27.28	99.16
Pump	0.9643	14.66	0.019077	0.00004734	0.00001539	0.81216	6.16176	28.12	86.82

جدول 14 پارامترهای انرژی اگزرژی اکونومی برای سناریو دوم

	Exergy Eff. (%)	$E_D$ (MW)	$Y_D$ (%)	$C_F$ (\$/KJ)	$C_P$ (\$/KJ)	$C_D$ (\$/h)	Z Total(\$/h)	r (%)	f (%)
Boiler	0.6107	71166	84.48642	0.000003	0.000005387	768.6	22894.884	75.65	16.46
Turbine	0.9056	4724	5.608209	0.0007581	0.0008279	12891.6	13077.216	9.209	1.419
Condenser	0.9203	8329	9.887971	0.0007581	0.003349	22730.4	2933.244	34.18	0.7184
Pump	0.9643	14.66	0.017404	0.001488	0.001547	78.516	83.8656	3.958	6.38

جدول 15 محاسبات انرژی اگزرژی اکونومی برای سناریو سوم

	Exergy Eff. (%)	$E_D$ (MW)	$Y_D$ (%)	$C_F$ (\$/KJ)	$C_P$ (\$/KJ)	$C_D$ (\$/h)	Z Total(\$/h)	r (%)	f (%)
Boiler	0.6304	56721	41.08757	0.000003	0.001365	612.36	18502.632	45.4	23.72
Turbine	0.9056	4724	3.421972	0.001061	0.001084	18442.8	9226.188	8.757	32.34
Deaerator	0.3795	57288	41.49829	0.0002145	0.001179	3564	3584.4768	43.4	57.9
Condenser	0.8162	19198	13.90665	0.0005788	0.0001315	9086.4	2459.484	34.03	1.563
Pump2	0.9708	117.7	0.08526	0.001488	0.001179	519.76	536.9256	88.5	44.8
Pump1	0.9642	0.3467	0.000251	0.0003732	0.001179	509.76	511.10352	61.18	26.15

توربین باید توجه بیشتری شود. هزینه سرمایه ای دی اریاتور در رتبه سوم قرار دارد ولی با توجه به ضریب هزینه نسبی ( $f$ ) بالا، با تغییر پارامترهای مانند تغییر فشار و دمای دریافتی جریان 7 از زیرکش توربین، بهبود کلی هزینه این تجهیز امکان پذیر است و از طرفی ضریب انرژی اگزرژی اکونومی  $f_k$  آن نیز نسبتا بالا است و به معنای هزینه اولیه بالای آن و هزینه بالای تخریب انرژی اگزرژی آن است که این هزینه ها به پارامترهای مختلفی مانند دما و فشار بخار ورودی به دی اریاتور و راندمان آن بستگی دارد لذا امکان بهبود آن وجود دارد.

اگر به تجهیز پمپ 1 و 2 توجه شود، هزینه نسبی آنها ( $f$ ) در بین سایر تجهیزات نسبتا زیاد است که نشان می دهد پارامترهای مانند نسبت فشار پمپ و راندمان آن روی آنها موثر بوده و با تغییر آنها امکان بهبود کلی هزینه آن نیز امکان پذیر است.

با در نظر گرفتن نمودار جریان سیستم توربین با زیرکش، بازگرمایش و هوازا در سناریو 3، شکل 3، محاسبات انرژی اگزرژی اکونومی در EES انجام و نتایج محاسبات (مرتب شده بر اساس  $Z\_Total$ (\$/h)) در جدول 15 مشاهده می شود.

با توجه به جدول مرتب شده، هزینه های بویلر، توربین و دی اریاتور از همه تجهیزات بیشتر می باشند. بالا بودن ضریب هزینه نسبی بویلر ( $f$ ) نشان می دهد که تغییر پارامترهایی مانند

فشار کاری و راندمان بویلر بهبود کلی هزینه این تجهیز را فراهم می آورد و با توجه به قرار گرفتن هزینه توربین در رده دوم و با توجه به ضریب انرژی اگزرژی اکونومی  $f_k$  توربین که مقدار آن نسبتا بالا است و به معنای هزینه اولیه بالای توربین می باشد که به پارامترهای مختلفی مانند دمای بخار ورودی به توربین، فشار توربین و راندمان آن بستگی دارد. بنابراین برای کاهش هزینه توربین در هنگام طراحی به امکان کاهش یک یا چند پارامتر از

## 7-7 مقایسه سناریو دوم و سوم

سناریو دوم و سوم مبنای بهتری بر تحلیل یک نیروگاه واقعی است. در بخش تحلیل انرژی بیان شد که در سناریو سوم با افزایش دی اریتور، پیش گرمایش سیال ورودی به بویلر بیشتر شده است و بازدهی انرژی و انرژی سیکل در این سناریو به ترتیب به مقادیر 0.2074 و 0.2691 رسید که بر اساس جدول 11 نسبت به سناریو دوم افزایش بازدهی انرژی و انرژی به ترتیب برابر 19.12% و 9.47% بوده است.

بررسی نتایج جداول 14 و 15 نشان می دهد که بکارگیری دی اریتور برای پیش گرم کردن ورودی به بویلر از نظر انرژی اکونومی، باعث افت هزینه (هزینه اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری) تجهیزات اصلی بویلر، توربین و کندانسور شده است.

## 7- نتیجه گیری

با توجه به اینکه نیروگاههای بخار کنونی طراحی تکامل یافته ای از چرخه بخار- مایع رانکین می باشند و نسبت به آن شکل بسیار پیچیده تری دارند لذا هدف این پژوهش بررسی سه سناریو اساسی نیروگاه های بخار در مقایسه با طراحی پایه (سیکل رانکین) می باشد تا عوامل موثر بر افزایش بازدهی در نیروگاه ها بررسی و با مقایسه نتایج از منظر انرژی، انرژی و انرژی اکونومی، لزوم تحولات لازم در تغییرات طراحی و تاثیر آن بر بازدهی نیروگاه ها مشخص شود. در این راستا سه سناریو طراحی تعریف شد. برای بکارگیری یک رویکرد ریاضی و انجام مدل سازی در هر سه سناریو فرض بر این است که سیستم در حالت پایدار کار می کند.

سناریو اول به دلیل عدم بکارگیری هیتزهای آب تغذیه و نیز عدم استفاده از توربین زیرکش دار به هیچ عنوان انعطاف پذیری نداشته و با این شکل طراحی، منطقی است که کاربردی در نیروگاه ندارد.

سناریو دوم با یک زیرکش و به جهت افزایش گرمای بخار خروجی از زیرکش و ورود مجدد به توربین نسبت به سناریو اول انعطاف پذیرتر است. از آنجاییکه مشخص شد، خروجی توربین در سناریوهای اول و دوم به صورت بخار مناسب و با کیفیت بالا

است لذا بهتر است که مستقیماً به کندانسور هدایت نشود، چون این بخار با کیفیت بالا می تواند پتانسیل تولید برق بیشتری را فراهم آورد. از اینرو در طراحی سناریو سوم از یک پیش گرم کن دی اریتور استفاده شده است که باعث افزایش بازدهی انرژی سیستم گردید و به همین دلیل در طراحی هایی پیشرفته تر قابل توجیه است که خروجی زیر کش های مختلف توربین به پیش گرم کن های بیشتری ارسال شوند. در عین حال سناریو سوم به جهت بکارگیری خروجی زیرکش در گرمایش آب تغذیه ورودی به بویلر، انعطاف پذیری بیشتری نسبت به سناریو دوم دارد لذا راهکار قابل قبولی در ارتقاء توان و بازدهی نیروگاه های بخار خواهد داشت. مشخصات برتر سناریو سوم در بکارگیری دی اریتور عبارتند از:

- 1- به تغییرات اساسی در نیروگاه نیازی نیست.
- 2- هزینه سرمایه گذاری در این سناریو نسبتاً پایین است.
- 3- نیروگاه با بکارگیری زیرکش های بیشتر جهت گرمایش بیشتر آب ورودی در مسیر بویلر انعطاف پذیری بالای دارد

در سناریو سوم با وجود بهبود میزان تخریب انرژی بویلر نسبت به دو سناریو قبلی، مشاهده می گردد که همچنان سهم بالای تخریب انرژی در بویلر است که مربوط به بازگشت ناپذیریهای غیرقابل دسترس در آن است. لذا توجه در بکارگیری تعداد بیشتری هیتز آب تغذیه برای کاهش بازگشت ناپذیری در بویلر دارای اهمیت می باشد.

تحلیل انرژی اکونومی مشخص ساخته است که بویلر و توربین بیشترین نرخ مجموع  $\dot{Z} + \dot{C}_D$  را داشته و بنابراین می باید به این تجهیزات توجه ویژه ای داشت. تغییر راندمان بویلر می تواند بهبود کلی هزینه این تجهیز را فراهم آورد و این کار با کاهش تخریب انرژی با پیش گرم کردن و کاهش تلفات و ورود هوای اضافی می تواند انجام گیرد و با توجه به فرار گرفتن هزینه توربین در رده دوم و اینکه ضریب انرژی اکونومی  $f_k$  توربین بالا است و این به معنای هزینه اولیه بالای توربین می باشد که به پارامترهای مختلفی مانند دمای بخار ورودی به توربین، فشار توربین و راندمان آن بستگی دارد. بنابراین برای کاهش هزینه توربین

مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت، 1397، دوره 18، شماره 02، صص 3

[3] I. Dincer, M. A. Rosen, P. Ahmadi, Optimization of Energy Systems, First Edition, pp. 275-297, New York: Wiley, 2017.

[4] Lei Zhang, L., Kong, C., Yang, T., Zhang, Y., Gao, W., "Performance analysis of turbine extraction superheat utilization schemes of built power plant", Energy Reports 6, 2020.

[5] Zhao, Z., Su, S., Si, N., Hu, S., Wang, Y., Xu, J., Jiang, L., Chen, G., Xiang, J., 2017. Exergy analysis of the turbine system in a 1000MW double reheat ultra-supercritical power plant. Energy 119, 540-548

[6] Zhao, Z., 2017. Cause analysis and solution of abnormal reheat steam temperature of utility boiler. Electr. Power. 50, 97-103

[7] Fu, Y., Ma, T., Liu, Y., 2017. An EBSILON-based evaluation method for energy saving of steam cooler. Therm. Power Gener. 46 (3), 14-18

[8] Liu, M., Zhao, Y., Wang, C., Yan, J., 2017. "Analysis on energy saving potentials of overheat recovery of steam extractions for double-reheat power unit. "Therm. Power Gener. 46, 49-53

[9] نشریه صنعت برق ایران، وزارت نیرو، شرکت مادر تخصصی توانیر، بهمن 1396

[10] Mohammadi Khoshkar Vandani, A., Bidi, M., Ahmadi, F., "Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plant" Energy Conversion and Management, 106, 1-9, 2015

[11] Noroozian, A., Mohammadi, A., Bidi, M., Ahmadi, M., "Energy, exergy and economic analyses of a novel system to recover waste heat and water in steam power

[12] Ahmadi, G., Toghraie, D., Akbari, O., "Solar parallel feed water heating repowering of a steam power plant: A case study in Iran" Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 474-485, (2017).

[13] EES. "Engineering Equation Solver", F-Chart, (2007)

[14] مهر پناهی، عبدالله، حسینعلی پور، سید مصطفی، "بهینه سازی بازتوانی گرمایش آب تغذیه موازی نیروگاه شهید رجایی بر اساس هزینه برق تولیدی"

[15] Escosa, J.M., and Romeo, L.M., "Repowering Conturbina de Gas de Una Central Termoelectrica de Carbon de 335 MW", google scholar

در هنگام طراحی به امکان کاهش یک یا چند پارامتر از توربین باید توجه بیشتری شود.

## 8- فهرست علائم

$C_p$  هزینه های مخصوص جریان

های محصول

$C_f$  هزینه های مخصوص جریان

های سوخت

$ex$  انرژی کلی جریان

$\Gamma_k$  اختلاف قیمت نسبی

$f_k$  ضریب انرژی اکونومی

$\dot{E}x$  نرخ انرژی کلی جریان

$\dot{Z}_k$  هزینه سرمایه ای تجهیز  $k$  ام

CRF فاکتور بازگشت سرمایه

## علائم یونانی

$\eta_{ex,k}$  بازدهی قانون دوم

$\Phi_r$  ضریب تعمیر و نگهداری

## زیر نویس ها

I ورودی

E خروجی

## 10- مراجع :

[1] M.H. Yang, R.H. Yeh, "Analysis of Optimization in an OTEC Plant using Organic Rankine Cycle", Renewable Energy, Vol.68, pp.25-34, 2014.

[2] باغشخی، مصطفی، صیادی، حسین "تحلیل انرژی و انرژی و بهبود کارکرد نیروگاه بخار در بارهای عملکردی مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، ماهنامه علمی پژوهشی، مجله

[16] Baghernejad, A. , Yaghoubi, M. “Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm “,Energy Conversion and Management 52 (2011) 2193–2203 , 2011

[17] H. Ahmadi,M., Mehrpooya, M. , Pourfayaz, F. , “Exergoeconomic analysis and multi objective optimization of performance of a Carbon dioxide power cycle driven by geothermal energy with liquefied natural gas as its heat sink” , Energy Conversion and Management 119 (2016) 422–434