



## تحلیل انرژی، انرژی-اقتصادی یک سیستم تولید همزمان حرارت و توان در سایت جامع

علیرضا پیرمحمدی<sup>۱</sup>، مهرانگیز قاضی<sup>۲</sup>، محمد نیکیان<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشجوی کارشناسی ارشد

alpimoh@gmail.com

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، دانشکده مهندسی مکانیک، استادیار.

mhrghazi@gmail.com

۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، دانشکده مهندسی مکانیک، استادیار.

m.nikian@gmail.com

### چکیده

قابل توجهی به گونه ای متفاوت از طریق گازهای داغ خروجی دودکش، برج های خنک کن، کندانسورها، خنک کننده ها در موتور ها و همچنین تلفات توزیع و انتقال الکتریسیته در شبکه سراسری به هدر می رود که بیشتر این حرارت قابل بازیافت است و می تواند در تأمین انرژی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. در روش تولید همزمان حرارت و توان، انرژی گرمایی از بازیافت تلفات حرارتی نیز به دست می آید و این حرارت در بخش های مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی به کار گرفته می شود. از طرفی الکتریسیته تولیدی توسط این روش به صورت محلی و مستقل و غیرمتمرکز می باشد.

تحلیل انرژی-اقتصادی روشی مرکب از تبدیل انرژی و قانون دوم ترمودینامیک می باشد، ناکارآمدی های ترمودینامیکی یک سیستم را برجسته می نماید. انرژی، به عنوان ماکزیمم مقدار کاری که میتواند توسط یک سامانه یا یک جریان جرم وقتی که وارد تعادل با دما و فشار و ترکیب شیمیایی با یک محیط مرجع می شود، تعریف می گردد [۱، ۲]. هر سیستم بدون تعادل با محیط، دارای مقداری انرژی است. وقتی یک سیستم در تعادل با محیطش قرار دارد، مطابق تعریف، مقدار انرژی برابر صفر است، چرا که دارای هیچ توانایی برای انجام کار نسبت به محیطش نیست.

سایت جامع، نیازهای واحد فرآیندی از قبیل الکتریسیته، نیرو برای حرکت در آوردن واحد های فرآیند، بخار در سطوح مختلف فشار و

غیره را فراهم می کند [۳]. در نتیجه طراحی سایت جامع بسیاری از مشکلات اعم از هزینه های انتقال انرژی به واحد های دیگر، اتلافات، و غیره نیز به نحو چشم گیری از بین می رود.

امروزه با مشاهده نواقص تولید و انتقال توان و حرارت، نیاز به طراحی سیستم های یکپارچه و متمرکزی که در آن نیروگاه ها و صنایع مصرف کننده در یک سایت در کنار هم قرار گیرند مورد توجه بسیاری از کشورهاست، چون اکثر فرآیند های صنعتی به نوعی یک

هدف از این مقاله، طراحی و تحلیل سیستم تولید همزمان حرارت و توان در یک سایت جامع از دیدگاه انرژی-اقتصادی است. در ابتدا با استفاده از مدل تکرار شونده پایین به بالا با بازده انرژی-اقتصادی که یک روش هدفگذاری اصلاحی جدید تولید همزمان می باشد، پتانسیل تولید همزمان حرارت و توان برای طراحی سیستم یوتیلیتی سایت جامع برآورد می شود. سپس، متغیرهای سامانه که شامل، دماهای سطوح بخار، توان تولیدی، دبی های سوخت، بخار و بار حرارتی بویلر محاسبه می گردد. در مرحله بعد، به تحلیل انرژی-اقتصادی-اقتصادی مورد مطالعاتی پایه، متشکل از سناریو چیدمان توربین های بخار فشار برگشتی با بار حرارتی و توان تولیدی ثابت پرداخته و نتایج حاصل از این تحلیل ها بررسی می گردد.

### واژه های کلیدی

تولید همزمان، سایت جامع، انرژی، انرژی-اقتصادی، محیط زیستی چیدمان توربین ها، روش تکرار شونده پایین به بالا

### مقدمه

در چند دهه گذشته، با افزایش قیمت انرژی و آسیب های زیست محیطی و نیز محدودیت در منابع فسیلی انرژی، استفاده از سیستم های تولید و تبدیل انرژی با راندمان بیشتری جهت صرفه جویی در این منابع ارزشمند، اهمیت بیشتری یافته است. از اینرو، امروزه مطالعه بر روی سیستم هایی که بطور همزمان برق و حرارت مورد نیاز را برای مصرف کنندگان تامین می کنند، مورد توجه قرار گرفته است. تولید همزمان حرارت و توان، یک روش صرفه جویی انرژی است که در آن حرارت و توان به طور همزمان تولید می شوند. حرارت حاصل از تولید همزمان می تواند به منظور گرمایش ناحیه ای یا در صنایع فرآیندی مورد استفاده قرار گیرد. در روش های معمول برای تامین نیاز های الکتریکی و حرارتی، الکتریسیته از شبکه توزیع سراسری و حرارت به وسیله سوزاندن سوخت در بویلر ها و تجهیزات گرما زا به روش تولید جداگانه تامین می گردد. در این روش انرژی

به چهل درصد به مقدار سه مگاوات تولید توان الکتریکی را افزایش داد. همچنین با محاسبات اقتصادی، بیشترین هزینه سرمایه ای اجزای سامانه به محفظه احتراق توربین گازی اختصاص یافت.

«احمدی، دینسر و رزن، ۲۰۱۱» [۹]، تحلیل انرژی و انرژی - اکونومیکی و محیط زیستی و بهینه سازی چند منظوره نیروگاه های سیکل ترکیبی را با الگوریتم تکاملی بررسی کردند. در این مقاله سه تابع هدف متشکل از، مینیمم نرخ قیمت کل، صدور مینیمم دی اکسید کربن و بازده ماکزیمم انرژی برای بهینه سازی سیستم بررسی شد. نتایج بهینه سازی نشان داد با انتخاب بهترین تجهیزات و با استفاده از کمترین نرخ سوخت به محفظه احتراق می توان کمترین صدور آلاینده های محیط زیستی را به دست آورد.

«عامری و عنادی، ۲۰۱۲» [۹]، تحلیل انرژی و انرژی اکونومیکی یک نیروگاه توربین گازی به همراه مدل سازی ترمودینامیکی و تحلیل عملکرد سیستم را انجام دادند. نتایج حاصل از تحلیل انرژی نشان داد که محفظه احتراق مهمترین عامل تخریب کننده انرژی در نیروگاه است که این امر به علت واکنش شیمیایی و اختلاف دمای بالا بین سیال در حال کار و سوزاننده ها بود. همچنین نتایج نشان می داد که افزایش دمای ورودی توربین گازی باعث افزایش بازدهی انرژی توربین گازی می شود. این افزایش بازدهی به علت افزایش توان خروجی توربین و کاهش اتلافات محفظه احتراق می باشد.

«غائبی و همکاران، ۲۰۱۲» [۱۰]، تحلیل های انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان موتور احتراق داخلی را بررسی نمودند. در این مقاله، تحلیل های انرژی، انرژی و ترمودینامیک یک سامانه ترکیبی سرمایه، گرمایش و توان CCHP ارائه شد. با اعمال قانون اول و دوم ترمودینامیک و تحلیل اقتصادی به طور همزمان، ابزاری قوی برای تحلیل سامانه های انرژی همچون سامانه های CCHP شد.

«نیکیل و همکاران، ۲۰۱۳» [۱۱]، تحلیل انرژی و شبیه سازی یک سیکل تولید همزمان ۳۰ مگاواتی را ارائه نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد غلظت محصولات احتراق تاثیر زیادی بر گرمای ویژه گازهای خروجی دارد چرا که آنتالپی محصولات احتراق کمتر از هوای فشرده حتی بعد از اضافه شدن سوخت به آن دارد.

«نوید و همکاران، ۲۰۱۴» [۱۲]، طراحی بهینه سیستم تولید همزمان بر مبنای تحلیل های انرژی - محیط زیستی را بررسی کردند. در این تحقیق، روشی جدید برای تحلیل سیستم های انرژی در صنایع فرایندی توسعه داده شد. مفهوم R-Curve جدید توسعه یافته در این تحقیق، بازدهی بهینه، هزینه ها، انتشار آلاینده ها، ضربات زیست محیطی، پارامترهای انرژی اکونومیکی و انرژی و محیط زیستی سامانه یوتیلیتی یک سایت جامع را نشان می دهد.

مجموعه ی کلی هستند که توسط یک مجموعه خدمات جانبی مرکزی به یکدیگر متصل شده اند [۴]. توربین ها با راندمان انرژی بالا، انرژی ورودی را به انرژی برق تبدیل می کنند [۵]. استفاده از توربین های میعانی و غیر میعانی در نیروگاه های تولید همزمان که در آنها بهره وری انرژی، با تولید همزمان توان و گرما بهبود یافته است از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. چنانکه محاسبات دقیق در طراحی و قرارگیری توربین ها در سایت، نتیجه ای برابر با صرفه جویی در تقاضای سوخت مصرفی نیروگاه ها را در بر خواهد داشت. در طراحی های سایت جامع تولید همزمان حرارت و توان، نحوه ی چینش توربین ها در فرآیند تولید حرارت و توان، اهمیت ویژه ای دارد، چرا که به علت هزینه های بالای راه اندازی توربین ها و سوخت مصرفی که بخار مورد نیاز توربین ها را تولید می کند، نحوه طراحی و چینش این تجهیزات می تواند باعث صرفه جویی یا در مقابل آن باعث ایجاد هزینه های اضافی غیر قابل توجیه گردد. در این مقاله، این چینش ها از دیدگاه انرژی در سایت جامع مورد توجه قرار می گیرند. با توجه به داده های طراحی یک سیستم تولید همزمان

در سایت جامع ( بار حرارتی سطوح بخار، فشار سطوح بخار، میزان بخار مورد نیاز هر سطح بخار و...) ابتدا پتانسیل توان در سایت جامع محاسبه خواهد شد و با توجه به توان تولیدی محاسبه شده و همچنین میزان بخار در هر سطح بخار که نشانگر پتانسیل تولید همزمان می باشند، مناسب ترین چیدمان توربین های بخار فشار برگشتی، توربین های میعانی و توربین های گازی از نقطه نظر کمترین تلفات انرژی و بیشترین بازده انرژی پیشنهاد خواهند شد.

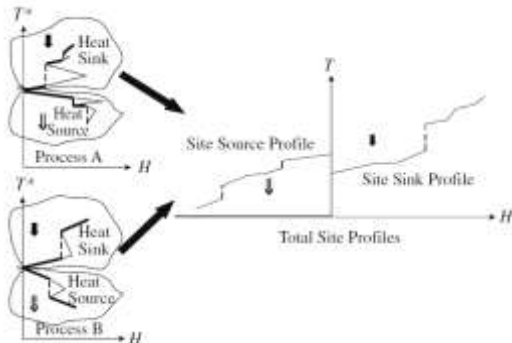
#### پیشینه تحقیق

«رزن و همکاران، ۲۰۰۴» [۶]، تاثیر خواص حالت مرده مختلف بر مبنای تحلیل انرژی و انرژی سیستم های حرارتی را مطالعه و بررسی کردند. در این تحقیق نشان داده شد که علی رغم وابستگی مقادیر انرژی و انرژی به خواص شدتی حالت مرده، نتایج اصلی تحلیل های انرژی و انرژی معمولاً حساسیت قابل توجهی به تغییرات معمول در این خواص ندارند.

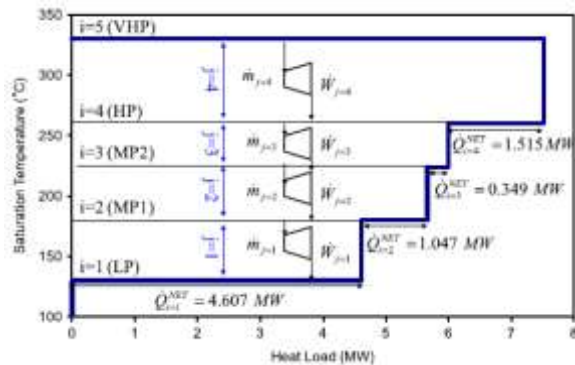
«بالی و همکاران، ۲۰۰۷» [۷]، عملکرد انرژی یک سیستم CHP به همراه اجزای آن (توربین های بخار در فشارهای متفاوت و لوله ها، شیرهای فشار شکن و نیز سامانه توربین گازی و HRSG و ژنراتور برق) در ترکیه را ارزیابی نمودند. در محاسبات اولیه بازدهی انرژی کل سامانه محاسبه شده و محفظه احتراق توربین گازی به عنوان نقطه پر مصرف انرژی تعیین گردید. سپس، برای بهینه سازی سامانه (MCHP)، با حذف شیرهای فشار شکن و جایگزینی آنها با توربین بخار فشار متوسط بازدهی انرژی با افزایش

## روش کار

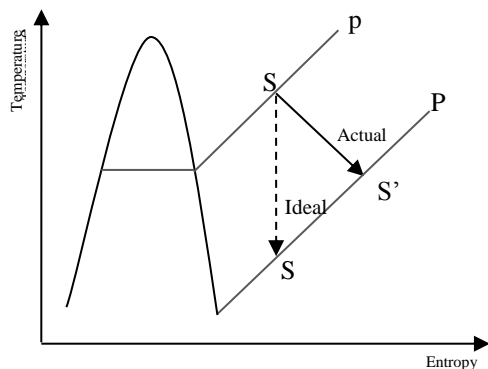
برای  $VHP$  برابر با ۴ است.  $SUGCC$  به  $M$  ناحیه انبساطی به وسیله بازه های دمایی مشخص تقسیم می شود. این مناطق به ترتیب از پایین به بالا با اندیس  $j$  شماره گذاری می شوند. در این محدوده یک توربین بخار قرار می گیرد که آن هم با اندیس  $j$  از پایین به بالا شماره گذاری می گردد. این چیدمان توربین های بخار، پتانسیل تولید همزمان بین هر بازه دمایی را فراهم می کند [۱۸].



شکل ۱- پروفایل سایت جامع حاصل از ترکیب نمودارهای ترکیبی جامع فرآیندها [۳]



شکل ۲- شماتیک جانمایی یوتیلیتی سیستم در  $SUGCC$ ، [۱۸].



شکل ۳- انبساط ترمودینامیک بخار در دو سطح فشاری مختلف بر روی دما-انتالپی، [۱۸].

به منظور محاسبه دقیق توان تولیدی در هر ناحیه از راندمان ایزنتروپیک استفاده می شود. شکل (۳) شماتیک انبساط ترمودینامیکی بخار در دو سطح فشاری مختلف بر روی نمودار دما-انتالپی می باشد. مرحله  $S_1-S_2$  بیانگر انبساط ایزنتروپیک است که در آن بازگشت ناپذیری مانند تلفات حرارتی و مکانیکی و ... وجود ندارد. مرحله  $S_1-S_2$  نمایش حالتی است که در واقعیت اتفاق می افتد. همان طور که در شکل مشاهده می شود خروجی توربین به سمت راست منتقل شده است که نشانگر افزایش آنترپی است که به علت

۱- آماده سازی  $SUGCC$ 

در مرحله اول هدف گذاری، اطلاعات مربوط به سایت جامع شامل جریان ها، فرایندها، تولید کننده ها و مصرف کننده های بخار در فرایندهای مختلف و ارتباط آنها با شبکه بخار مشخص شده و در ادامه نمودار سایت جامع، نمودار ترکیبی سایت جامع، نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع ترسیم می گردد. در واقع گام نخست به منظور هدف گذاری حرارت و توان در سایت جامع، نمایش نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت می باشد. برای تحلیل و بررسی سایت جامع و برای ایجاد امکان هدفگذاری در سایت، یک دیاگرام دما-انتالپی همانند منحنی ترکیبی برای یک فرایند مورد نیاز است. ابتدا باید منحنی ترکیبی فرایندها و سپس منحنی ترکیبی جامع فرایندها را ترسیم نمود. یعنی در شرایط طراحی یک سایت جدید، ابتدا باید نمودارهای ترکیبی جامع هر یک از فرایندها را باهم ترکیب نمود تا یک تصویر از کل سایت به دست آید، (شکل-۱). همانطور که در این شکل نشان داده شده است، نمودارهای ترکیبی جامع دو فرایند با چشمه و چاه های حرارتی متفاوت با یکدیگر ترکیب شده اند و نمودار ترکیبی گرم و سرد سایت را ایجاد نموده اند [۱۷].

## ۲- پتانسیل هدفگذاری تولید همزمان

روابط مربوط به پتانسیل همزمان به دو بخش محاسبات مربوط به توان تولیدی و محاسبات مربوط به بار حرارتی تولیدی تقسیم می شود که این روابط بر مبنای الگوریتمی به نام مدل تکرارشونده پایین به بالا ( $IBTM$ ) انجام می شود. در این بخش، روش هدف گذاری تولید حرارت و توان در یوتیلیتی سایت جامع با دقتی بالا ارائه گردیده است. در واقع هدف از این روش، پیدا کردن مقدار توان تولیدی بین هر دو سطح بخار، پتانسیل تولید همزمان، دبی گذرنده از توربین ها، بار حرارتی بویلر و میزان مصرف سوخت می باشد. در روش اصلاحی جدید بازه ایزنتروپیک در هر مرحله، متغیر در نظر گرفته شده و این بازه متغیر در الگوریتم تکرار شونده لحاظ می گردد. بنابراین دقت محاسبات توان تولیدی توربین های بخار، دمای مافوق گرم سطوح و بار حرارتی بویلر با استفاده از روش اصلاحی  $IBTM$ ، بیشتر می شود [۱۷].

در روش جدید  $IBTM$  اصلاح یافته به آن پاسخ داده شده است، (قاضی و همکاران، ۲۰۱۴)، [۱۶]. در ابتدا به معرفی نحوه کدگذاری سیستم یوتیلیتی سایت جامع پرداخته می شود. در شکل (۲) نمودار ترکیبی یوتیلیتی سایت جامع به منظور نمایش نحوه کدگذاری نشان داده شده است. در مدل ارائه شده تعداد  $N$  سطح بخار معلوم با نام  $j$  از پایین ترین سطح شماره گذاری شده اند. به این معنی که با در نظر گرفتن  $LP$  به عنوان پایین ترین سطح، شناسه  $i$  برای این سطح برابر ۱، برای سطح  $MP$  برابر با ۲، برای سطح  $HP$  برابر با ۳ و

$$A = b_0 + b_1 \Delta T_{sat} \quad (3)$$

$$B = b_2 + b_3 \Delta T_{sat} \quad (4)$$

ضرایب  $b_0$  تا  $b_3$  از رگرسیون داده های پترسون و مان مشخص می شوند و در جدول (۱) آورده شده اند [۱۶]. باید دقت شود که این ضرایب از داده های منتشر شده، اقتباس شده اند و ممکن است لزوماً دقت کافی برای پیشگویی عملکرد همه توربین های بخار را نداشته باشند. پیشنهاد می شود که اگر از سازنده های تجهیزات، داده های طراحی در دسترس باشند، یک رگرسیون مستقل برای طراحی دیگر توربین های بخار انجام گیرد.

تلفات می باشد. بنابراین راندمان ایزنتروپیک در اصل نسبت اختلاف آنتالپی مراحل  $S_1-S_2$  و  $S_1-S_2$  است [۱۶]. راندمان ایزنتروپیک تابعی از بار است و برای میزان ثابت دبی ثابت دبی بهتر است که توربین را در بالاترین راندمان، یعنی با فرض حالت بار کامل در دبی مورد نظر گرفت. در این الگوریتم از مدل ترمودینامیکی واربانو برای تخمین راندمان ایزنتروپیک استفاده شده است [۱۹]:

$$\eta_{ise} = \frac{\dot{W}_{max}}{\dot{W}_{ise,max}} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{max} = \frac{\dot{W}_{ise,max} - A}{B} \quad (2)$$

که در رابطه فوق ضرایب  $A$  و  $B$  اعدادی ثابت هستند که وابسته به توربین بوده و تابع اختلاف دمای اشباع می باشند و به وسیله فرمول های (۳) و (۴) محاسبه می گردند.

	توربین های بخار فشار برگشتی		توربین های کندانسی (میعانی)	
	$\dot{W}_{max} \leq 2000 \text{ kW}$	$\dot{W}_{max} > 2000 \text{ kW}$	$\dot{W}_{max} \leq 2000 \text{ kW}$	$\dot{W}_{max} > 2000 \text{ kW}$
$b_0 \text{ (kW)}$	0	0	0	-463
$b_1 \text{ (kW/}^\circ\text{C)}$	1.08	4.23	0.662	3.53
$b_2$	1.097	1.155	1.191	1.22
$b_3 \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	0.00172	0.000538	0.000759	0.000148

جدول ۱- ضرایب مشخص شده از رگرسیون داده ها، [۱۸]

$$\dot{m}_j = \dot{m}_{j-1} + \dot{m}_i^{USE} - \dot{m}_i^{GEN} \quad (9)$$

	توربین های بخار فشار برگشتی		توربین های کندانسی
	$W_{max} < 8 \text{ MW}$	$W_{max} > 8 \text{ MW}$	
$a_L$	0.248	0.190	-0.01
$b_L \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	-0.00126	-	0.000326
	0.000790		

جدول ۲- ضرایب رگرسیون در معادله نسبت تقاطع، [۱۶].

که  $\dot{m}_i^{GEN}$  دبی بخار تولیدی توسط فرایند و  $\dot{m}_i^{USE}$  دبی بخار مورد نیاز فرایند در سطح  $h$  است که می تواند از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه شود:

$$\dot{m}_i^{USE} = \frac{\dot{Q}_i^{USE}}{h_i^{ACTUAL} - h_{f,i}} \quad (10)$$

$$\dot{m}_i^{GEN} = \frac{\dot{Q}_i^{GEN}}{h_i^{ACTUAL} - h_{f,i}} \quad (11)$$

که در این روابط،  $h_{f,i}$  آنتالپی مایع اشباع و  $h_i^{ACTUAL}$  آنتالپی سطح در سطح فشار  $i$  ام است. میزان بار حرارتی خالص مربوط به هر ناحیه توسط رابطه (۱۲) محاسبه می شود:

$$\dot{Q}_i^{NET} = \dot{Q}_i^{USE} - \dot{Q}_i^{GEN} \quad (12)$$

با ترکیب دو رابطه (۱) و (۲) راندمان ایزنتروپیک به صورت تابعی از توان بیشینه توربین به دست می آید:

$$\eta_{ise} = \frac{\dot{W}_{max}}{A + B \dot{W}_{max}} \quad (5)$$

که توان بیشینه توربین به صورت زیر نوشته می شود (واربانو، دوپله و اسمیت، ۲۰۰۴: ۸۲، [۱۹]):

$$\dot{W}_{max} = \frac{n \cdot m_{max}}{L+1} \quad (6)$$

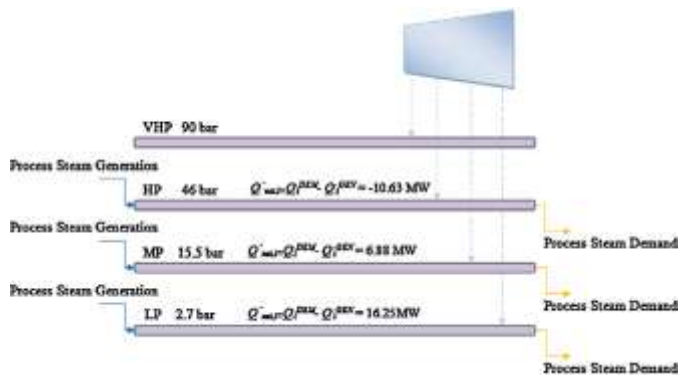
همچنین ضریب  $n$  از رابطه (۷) محاسبه می شود که در آن  $m_{max}$  حداکثری دبی عبوری از سطح و  $\Delta h_{ise}$  اختلاف آنتالپی در حالت آنتروپی ثابت می باشد:

$$n = \frac{L+1}{B} \left( \Delta h_{ise} - \frac{A}{m_{max}} \right) \quad (7)$$

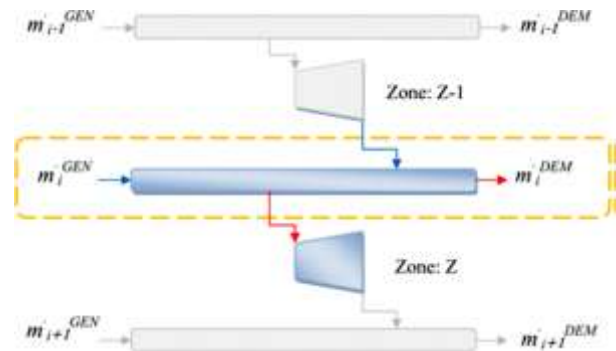
واربانو و همکاران، معادله زیر را برای تخمین مقدار  $L$  پیشنهاد داده اند، [۱۹]:

$$L = a_L + b_L * \Delta T_{sat} \quad (8)$$

جدول ۲- مقدار پارامترهای  $a_L$  و  $b_L$  موجود در معادله (۸) را نشان می دهد. دبی جرمی بخار گذرنده از زمین توربین ( $\dot{m}_j$ ) با نوشتن موازنه جرمی در سطح  $i$  ام، در خروجی توربین  $z$  ام، از رابطه (۹) به کمک شکل (۴) به دست می آید:



شکل ۵- سیستم یوتیلیتی سایت جامع برای یک پالایشگاه (مورد مطالعاتی)، [18]



شکل ۴- بالانس دبی جرمی برای جریان اصلی  $i$  ام، [17]

که پانویس های  $e$  نو به ترتیب، معرف جریان های ورودی و خروجی حجم کنترل می باشند. نرخ انرژی یک جریان جرم با چشم پوشی از مولفه های پتانسیل و جنبشی انرژی می تواند به شکل زیر نوشته می شود [۷]:

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (15)$$

جهت محاسبه توان توربین های بخار می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\dot{W}_i = \dot{m}_i(h_i - h_{i+1}) \quad (19)$$

برای محاسبه نرخ انرژی با چشم پوشی از اثرات جنبشی و پتانسیل خواهیم داشت:

$$\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} \quad , \quad \dot{E} = \dot{m}e \quad (16)$$

انرژی سوخت به طور تقریبی با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه می باشد [8]:

$$\xi = \frac{ex_f}{LHV_f} \quad (17)$$

نسبت انرژی شیمیایی به  $LHV_f$  (ارزش حرارتی پایین سوخت) به طور معمول برای سوخت های گازی مورد استفاده قرار می گیرد و برای مقدار آن برای گاز طبیعی (متان) برابر با ۱.۰۶ می باشد. همچنین مقدار ارزش حرارتی پایین سوخت برای سوخت گاز طبیعی برابر  $49433,96 kJ/kg^{-1}$  می باشد. برای یک سوخت گازی با ترکیب  $C_xH_y$ ، رابطه تجربی زیر جهت تخمین  $\xi$  استفاده می شود [8]:

$$\xi = 1.033 + 0.0169 \frac{y}{x} - \frac{0.0698}{x} \quad (18)$$

### ۳- تحلیل انرژی

در نبود اثرات هسته ای، مغناطیسی، الکتریکی و تنش سطحی، انرژی کلی یک سیستم می تواند به چهار جزء تقسیم گردد. انرژی فیزیکی، انرژی جنبشی، انرژی پتانسیلی و انرژی شیمیایی. که در این مقاله از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیلی چشم پوشی می کنیم. برخلاف انرژی، انرژی از قانون بقا تبعیت نمی کند و از طریق بازگشت ناپذیری های سیستم تخریب می گردد. این بازگشت ناپذیری ها، به دو نوع، درونی و بیرونی طبقه بندی می شود. منابع اصلی بازگشت ناپذیری های داخلی شامل اصطکاک، انبساط نامحدود، اختلاط و واکنش شیمیایی می باشند. بازگشت ناپذیری های بیرونی، به علت انتقال حرارت از طریق یک اختلاف دمای محدود افزایش می یابد. انرژی زمانی اتلاف می گردد که انرژی مرتبط با یک ماده یا جریان انرژی به محیط منتقل گردد [۱۳].

انرژی فیزیکی، به عنوان ماکزیمم کار مفید تئوری یک سیستم در تعادل با محیط آن سیستم اتلاف می گردد. انرژی شیمیایی، مربوط به بخش ترکیب شیمیایی یک سیستم از تعادل شیمیایی اش می باشد. انرژی شیمیایی یکی از مهم ترین بخش های انرژی در فرایند احتراق می باشد [۱۴]. جهت انجام تحلیل انرژی نیازمند بالانس جرمی و بالانس انرژی سیستم برای بدست آوردن نرخ دبی ها و نرخ انتقال حرارت در سطح کنترل هستیم. با اعمال یکی از این بالانس ها به قوانین اول و دوم ترمودینامیک، فرمولی برای بالانس انرژی بدست خواهد آمد [۸]:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (13) \text{ معادله انرژی}$$

$$(14) \text{ معادله بالانس انرژی}$$

$$\dot{E}_Q + \sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_e \dot{m}_e h_e + \dot{E}_W + \dot{E}_D + \dot{E}_L$$

دست می آیند. با ترکیب بالانس انرژی و بالانس انرژی-اقتصادی می توان به رابطه زیر رسید [14]:

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{L,k} + \dot{E}_{D,k} \quad (21)$$

که  $\dot{E}_{F,k}$  معرف نرخ انرژی سوخت (خوراک) جزء  $K$  ام،  $\dot{E}_{P,k}$  معرف نرخ انرژی محصول جزء  $K$  ام،  $\dot{E}_{L,k}$  و  $\dot{E}_{D,k}$  به ترتیب نرخ انرژی اتلافی و تخریبی جزء  $K$  ام سیستم می باشند. برای محاسبه نرخ انرژی تخریبی می توان از رابطه زیر استفاده کرد [14]:

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (22)$$

جهت محاسبه نرخ هزینه سرمایه گذاری تجهیزات می توان از رابطه زیر استفاده کرد [14]:

$$\dot{Z}_k = Z_k \cdot CRF \cdot \varphi / (N \times 3600) \quad (23)$$

در رابطه بالا،  $Z_k$  معرف هزینه خرید جزء  $K$  ام بر حسب دلار که از روابط زیر بدست می آید [20]:

$$(24)$$

$$Z_{ST} = 151.13 \dot{W}_{ST} + 356250 \quad (25)$$

$$(25)$$

$$Z_{BOILER} = 30337.015 m_B^{1.5} + 1407058.4$$

که  $\dot{W}_{ST}$  توان تولیدی توربین بر حسب کیلووات،  $m_B$  دبی بخار تولیدی توسط بویلر بر حسب کیلوگرم بر ثانیه و  $Z_{ST}$  و  $Z_{BOILER}$  بر حسب دلار محاسبه می گردند.

همچنین  $N$  کارکرد سالیانه در یک سال بر حسب ساعت و ضریب نگهداری تجهیزات ( $\varphi$ ) عموماً ۰.۶ فرض می گردد [۸].  $CRF$  فاکتور بازگشت سرمایه از رابطه زیر بدست می آید و در این تحقیق مقدار آن برابر ۰.۰۸ می باشد [۱۴]:

$$CRF = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (26)$$

که  $i$ ، نرخ بهره با مقدار ۵ درصد و  $n$ ، عمر سالیان کارکرد تجهیزات می باشد.

مجموع  $\dot{Z}_k$  و  $\dot{C}_{D,k}$  معیاری برای بهینه کردن تجهیزات در محاسبات انرژی اقتصادی می باشد و کمینه کردن این مقدار به عنوان تابع هدف بهینه سازی انرژی-اقتصادی مطرح می گردد.

#### مورد مطالعاتی

در این تحقیق، برای نشان دادن قابلیت کاربردی تحلیل انرژی در سایت جامع با استفاده از دیتاهای حاصل از روش  $IBTM$  واحد سرویس های جانبی پالایشگاه کلتکس آفریقای جنوبی [۱۵] (شامل برج تقطیر اتمسفریک نفت خام، برج تقطیر خلاء، واحد شکافت هیدروژن، واحد شکافت کاتالیستی، واحد کاهش گرانبوی، واحد تصفیه هیدروژنی نفتا، دیزل و کروژن، و واحد پلازما استفاده شده است. شکل-۵ سیستم یوتیلیتی سایت جامع برای یک پالایشگاه را نشان می دهد. همچنین اطلاعات مربوط به دماهای خطوط فشار

در تحلیل انرژی نیروگاه، انرژی جریان در تمام نقاط محاسبه شده و تغییرات در انرژی برای هر جزء سیستم بدست می آید. منبع انرژی تخریبی در بویلر و توربین بخار به طور عمده در فرآیند احتراق و انرژی اتلافی در مسیر جریان اتفاق می افتد، از آنجا که در این مقاله به علت ماهیت تحقیق، از عناصری مانند کندانسور در سامانه نیروگاه بخار و دودکش گازهای خروجی توربین گاز استفاده نشده است، از اثر انرژی اتلافی در محاسبات چشم پوشی می کنیم.

#### ۴- تحلیل انرژی-اقتصادی

تکنیک های توسعه یافته جهت طراحی سیستم های انرژی با هزینه های کارآمد یکی از مهمترین چالش های مهندسی انرژی می باشد. در جهانی با منابع طبیعی محدود، با افزایش تقاضای انرژی توسط کشورهای توسعه یافته، روز به روز اهمیت شناخت مکانیزم های کاهنده انرژی بیشتر می شود. همچنین، توسعه دیدگاه های سیستمی برای پیشرفت طراحی سیستم های انرژی و کاهش ضربات زیست محیطی بیشتر احساس می شود. ترکیب قانون دوم ترمودینامیک با نگرش های اقتصادی ابزاری قدرتمند را برای مطالعه و بهینه سازی سیستم های انرژی ارائه می نماید. این اشکال ترکیبی اساس روش های ترموآکونومیک (و انرژی-اقتصادی) می باشد. به علاوه اینکه، بسیاری از محققین روش های مناسبی را برای تحلیل های اقتصادی بر مبنای مفاهیم انرژی با اسامی ای همچون، ترموآکونومیک، قیمت گذاری قانون دوم و انرژی-اقتصادی (اگر انرژی-اقتصادی)، ارائه نموده اند.

در تحلیل انرژی اقتصادی بالانس هزینه برای هر جزء محاسبه می گردد. اعمال یک بالانس هزینه برای اجزاء سیستم  $K$  ام نشان دهنده این امر است که جمع نرخ هزینه های مرتبط با کل جریان انرژی موجود مساوی است با مجموع نرخ هزینه های جریان های انرژی ورودی به علاوه هزینه سرمایه گذاری و هزینه های عملیاتی و نگهداری تجهیزات. این بالانس بصورت زیر فرمول بندی می گردد [14]:

$$(19)$$

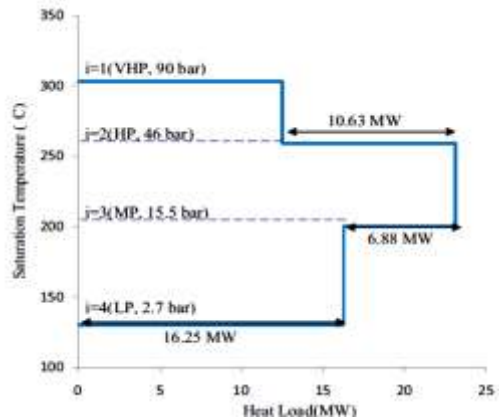
$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k$$

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}_j \quad (20)$$

در اینجا برای توضیحات بیشتر مفهوم انرژی نیاز به توضیح عبارات سوخت و محصول می باشد. تولید انرژی در رابطه با اجزاء سیستم معرفی می گردد. و سوخت (خوراک) معرف منبعی است که جهت تولید محصول مصرف می گردد. هر دو عامل محصول و سوخت در رابطه با انرژی بیان می شوند. هزینه مربوط به سوخت ( $\dot{C}_F$ ) و محصول ( $\dot{C}_P$ ) در یک جزء با جایابی نرخ های انرژی ( $\dot{E}$ ) به

مورد مطالعاتی و یا بررسی استفاده از چیدمان های مختلف توربین های بخار فشار برگشتی در بین خطوط فشار می باشد.

مطابق جدول-۴ از طریق روش تکرار شونده پایین به بالا (IBTM) محاسبه شده است [۱۵].



شکل-۶ نمودار SUGCC مورد مطالعاتی [۲۱]

	VHP	HP	MP	LP
Pressure (bar(a))	90	46	15.5	2.7
Saturation temperature (°C)	303	259	200	130
Net heat load (MW)	.	-10.63	6.88	16.25

جدول-۴ اطلاعات مربوط به دماهای خطوط فشار [۲۱]

Methodology	Error %	Total (MW)	VHP-HP (MW)	HP-MP (MW)	MP-LP (MW)
IBTM	-2.91	4.520	0.80	1.9	1.70
THM [Model in STAR]	-7.33	4.400	0.50	1.9	1.80
SHM	19.15	4.200	1.80	1.9	1.70
New method	-0.26	5.400	0.57	2.0	1.95
STAR simulation	-0.22	4.521	0.57	2.0	1.951
Thermoflow simulation	-	4.524	0.571	2.001	1.952

جدول-۵ مقایسه نتایج هدفگذاری تولید همزمان (خوشگفتار منس و همکاران، ۲۰۱۳: ۹۱)، [۲۱]

	$\dot{E}_d$ [KW]	Z [\$]	$\dot{C}_d$ [\$ /hr]	$\dot{Z}$ [\$ /hr]	$\dot{Z} + \dot{C}_d$ [\$ /hr]	$\eta_{ex}$
ST1	219.5775	442390	5.3555	10.4524	15.8079	0.7219
ST2	518.5757	658510	12.4240	15.5586	27.9826	0.7941
ST3	529.1766	650950	12.5066	15.3801	27.8866	0.7866
Boiler	10114	1294900	279.4472	42.1790	321.6262	0.4206

جدول-۶ مقایسه نتایج اگزرژی-اقتصادی مورد مطالعاتی

### نتایج تحلیل اگزرژی-اقتصادی

از آنجایی که هدف از تحلیل اگزرژی-اقتصادی استفاده از ملاحظات اقتصادی در کنار تحلیل های اگزرژی به منظور طراحی های بهینه سیستم های انرژی از نقطه نظر اقتصادی است، از اینرو اهمیت داشتن نگاه اقتصادی در این تحلیل از آنجا مشخص می شود که قیمت سرمایه گذاری تجهیزات و نیز هزینه سوخت مصرفی جهت تولید بخار مورد نیاز در سیستم در بازه های زمانی طولانی به میلیون ها دلار می رسد. کاستن از این هزینه ها علاوه بر صرفه جویی اقتصادی نتایجی همچون کاهش صدور آلاینده های جوی را در بر خواهد داشت. در جدول-۶ تابع هدف  $\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$  مفهومی برای رسیدن به مقدار بهینه اگزرژی-اقتصادی تجهیزات مورد استفاده در سیستم تولید همزمان می باشد. این میزان در بین توربین دوم و سوم مقداری تقریباً برابر است و نیز بویلر دارای بالاترین میزان نرخ هزینه های تخریب اگزرژی و هزینه های اقتصادی تجهیزات است که یافتن راهکاری جهت کمینه نمودن تخریب اگزرژی در بویلر می تواند به

### نتایج تحلیل اگزرژی

همانطور که اشاره شد، هدف از تحلیل اگزرژی پیدا کردن نقاط بازگشت ناپذیری در سیستم می باشد. با توجه به نتایج موجود در جدول-۶، در بین سه توربین بخار فشار برگشتی مورد استفاده در مورد مطالعاتی توربین دوم با تولید دو مگاوات برق بیشترین مقدار توان را در چیدمان توربین ها تولید می کند. از این رو بیشترین تخریب اگزرژی مربوط به این توربین می باشد. همچنین با مقایسه نتایج بازدهی اگزرژی در توربین ها بالاترین میزان بازدهی اگزرژی نیز مربوط به توربین شماره دو می باشد. از آنجا که معیار برتری اگزرژتیک در یک سیستم مطالعاتی بالا بودن بازدهی و پایین بودن تخریب اگزرژی است از این رو می توان به این نتیجه رسید که توربین شماره دو به علت بالا بودن تخریب اگزرژی از کارایی بالایی برخوردار نمی باشد. پس می توان به این نتیجه رسید که برای این سیستم تولید همزمان، نیازمند بهینه سازی از دیدگاه اگزرژی است، طرح هایی که برای بهینه سازی این سیستم پیشنهاد می شود بررسی استفاده از توربین های کوچک با توان و حرارت یکسان با این

[۱۲] Navid P., et al., 2014, *Optimal Design of Cogeneration System Based On Exergoenvironmental Analysis*, Clean Technologies and Environmental Policy, Volume 16, Issue 6, pp 1045-1065.

[13] Çolpan C. Ö., 2005, *Exergy Analysis of Combined Cycle Cogeneration Systems*, M.Sc.Thesis, Middle East Technical University, Turkey.

[14] Ameri M., Ahmadi P., Hamidi A., *Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study*, International Journal of Energy Research Int. J. Energy Res. 2009; 33:499-512

[15] Ghannadzadeh A., et al., 2012, *Cogeneration Targeting for Site Utility Systems*, Applied Thermal Engineering, 43, pp.60-66.

[۱۶] قاضی م.، ۱۳۹۳، مدل سازی، شبیه سازی و اصلاح سیستم های تولید همزمان در کل سایت با استفاده از تئوری ساختاری با رویکرد صنعتی، پایان نامه دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.

[17] Khoshgoftar Manesh M. H., et al., 2013, *New emissions targeting strategy for site utility of process industries*, Korean J. Chem. Eng., 30(4), pp.796-812

[18] Khoshgoftar Manesh M. H., et al., 2013, *A new cogeneration targeting procedure for total site utility system*, Applied Thermal Engineering, 54, pp. 272-280.

[19] Varbanov, P.S., Doyle, S., Smith, R., 2004, *Modelling and optimization of utility systems*. Chem. Eng. Res. 82 (5), pp. 561-578.

[۲۰] Shamsi, S., Omidkhan R. S., 2012, *Optimization of Steam Pressure Levels in a Total Site Using a Thermo-economic Method*, Energies, 5, PP.702-717; doi:10.3390/en5030702

[۲۱] Khoshgoftar Manesh M. H., et al., 2013, *A new targeting method for estimation of cogeneration potential and total annualized cost in process industries*, chemical engineering research and design 91, pp. 1039-1049

منظور کاهش بازگشت ناپذیری ها در بویلر و در مجموع سیستم تولید همزمان حرارت و توان نقش موثری داشته باشد.

#### مراجع:

[1] Dincer I., Rosen M. A., 2007, *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier.

[۲] Barzegar H, et al., 2011, *Thermo-Economic Environmental Multi-Objective Optimization of a Gas Turbine Power Plant with Preheater Using Evolutionary Algorithm*. Int J Energy Res, 35(5), p. 389-403.

[۳] Smith R., 2005, *Chemical Process Design and Integration*, Wiley, West Sussex.

[۴] Raissi K., 1994, *Total Site Integration*, PhD thesis, UMIST, Manchester.

[۵] نصرآزادانی، سید حسین. احمدی، دانش حسین. تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه بخار پالایشگاه اصفهان، نشریه علمی پژوهشی مدیریت انرژی، ۱۳۹۱، شماره دوم، سال دوم، صفحه ۲۸-۳۹.

[۶] Rosen MA, Dincer I., 2004, *Effect of Varying Dead-State Properties on Energy and Exergy Analyses of Thermal Systems*, Int J Thermal Sci, 43(2), p.121-133.

[۷] Balli O., et al., 2007, *Exergetic Performance Evaluation of a Combined Heat and Power (CHP) System in Turkey*, Int. J. Energy Res, 31, pp. 849-866.

[۸] Ahmadi P, Dincer I, Rosen M. *Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants*. International Journal of Energy; 2011;36:5886-5898.

[۹] Ameri M., Enadi N., 2012, *Thermodynamic Modeling and Second Law Based Performance Analysis of a Gas Turbine Power Plant (Exergy and Exergoeconomic Analysis)*, Journal of Power Technologies, Vol 92, No 3.

[1۰] Ghaebi H., et al., 2011, *Energy, Exergy and Thermo-economic Analysis of a Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) System with Gas Turbine Prime Mover*, Int. J. Energy Res. 35, p. 697-709.

[۱۱] Nikhil Dev, et al., 2013, *Exergy Analysis and Simulation of A 30MW Cogeneration Cycle*, Frontiers of Mechanical Engineering, Volume 8, Issue 2, p. 169-180.