

## تحلیل بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی از توربین‌های گازی در ایستگاه تقویت فشار گاز قزوین

مهدی خواجه‌وند<sup>۱</sup>، علی حیدری<sup>۲\*</sup>، مصطفی مافی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران، khajevandm@yahoo.com

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران، heydari.a@gmail.com

۳- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران، m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق، ابتدا واحدهای بازیافت حرارت به‌عنوان راه‌حلی مناسب در صرفه‌جویی انرژی معرفی می‌گردد. در ادامه به تحلیل بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی تأسیسات تقویت فشار گاز قزوین پرداخته‌شده و میزان اتلاف انرژی آن، از طریق تخلیه گازهای داغ خروجی از دودکش توربین‌های گازی موجود به محیط تعیین گردیده است. برای این کار با توجه به اطلاعات مربوط به ایستگاه تقویت فشار قزوین و با کمک نرم‌افزار اسپن هابسس ابتدا جریان انرژی موجود در گازهای داغ خروجی از دودکش در دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین شبیه‌سازی شده و ظرفیت برداشت حرارت در دو حالت استخراج گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای یک واحد ۵۰ مگاواتی نزدیک به ۹۰ مگاوات اتلاف انرژی وجود دارد لازم به ذکر است که ظرفیت برداشت حرارت تا اندازه زیادی به دبی و دمای گاز خروجی وابسته است. در ادامه با توجه به پیشنهادها موجود و به‌عنوان یک نمونه، حرارت حاصله از گازهای داغ خروجی از دودکش در حالت بیشینه دور توربین به‌عنوان مولد یک نیروگاه بخار استفاده‌شده و پارامترهای مؤثر آن نظیر فشار خروجی توربین و پمپ و دمای ورودی به مبدل بازیافت حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلیدواژگان: مبدل بازیافت حرارت، ایستگاه تقویت فشار گاز، بازیافت انرژی حرارتی، توربین گاز.

## Analysis of heat recovery from hot exhaust of gas turbines in compressed pressure Qazvin gas station

mahdi khajehvand<sup>1</sup>, Ali heydari<sup>2\*</sup>, mostafa mafi<sup>3</sup>

1- Master of science student, mechanical engineering department, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

3- Assistant prof. mechanical engineering department, international University of Imam Khomeini, Qazvin, Iran

\* P.O.B. 35141-179 Semnan, Iran, email: heydari.a@gmail.com

### Abstract :

In this study First, The heat recovery unit as an appropriate solution The energy savings will be introduced. Went on to study heat recovery from the hot exhaust gas compression facilities Qazvin And the waste of energy, The evacuation of hot gases through the exhaust flue gas turbines on the environment has been determined For this work, according to data compression station Qazvin Aspen software with the help of the flow of energy in the hot gas exhaust flue Haysys first in both the max Simulation results show that for a unit of 50 MW to 90 MW of energy waste is near imum and minimum simulated turbine and heat removal capacity in both -Grdyd extraction. Dark The heat removal capacity is largely dependent on the flow rate and temperature of the exhaust gas Then, according to the existing proposals and as an example, heat generated from the hot exhaust gases from the chimney at a power plant generating steam used as the maximum speed turbine and turbine output parameters such as pressure and pump inlet temperature of heat recovery exchanger examined Placed.

**Keywords:** recovery of heat exchangers, gas compressor stations, recycling thermal energy, gas turbine.

طراحی و استفاده از واحدهای تولید همزمان، همراه با سیاست توزیع پراکنده برق می‌تواند علاوه بر کاهش چشمگیر هزینه‌های تولید، توزیع و انتقال الکتریسیته؛ موجب کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیز افزایش دسترسی و امنیت برق در شبکه گردد. نکته مهم در به‌کارگیری از این فناوری، مدیریت صحیح انرژی و بهینه‌سازی در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم است.

استفاده از گازهای داغ خروجی توربین‌های گاز جهت افزایش راندمان واحد نیروگاهی، یکی از فناوری‌های تولید همزمان می‌باشد که به‌طور گسترده در بخش‌های صنعتی و غیر صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا می‌توان با به‌کارگیری این فناوری در جهت استفاده از حرارت اتلافی گازهای داغ، در افزایش راندمان صنایع نیروگاهی و تولیدی، که در صرفه‌جویی اقتصادی کشور در سطح کلان بسیار مؤثر است، گام برداشت.

یکی از بخش‌هایی که در آن توربین گاز به‌عنوان محرک اصلی واحد مورد استفاده قرار می‌گیرد، ایستگاه‌های تقویت فشار گاز می‌باشد، که با توجه به تعداد بالا و پراکندگی این ایستگاه‌ها در سطح کشور (به جهت توزیع گاز از

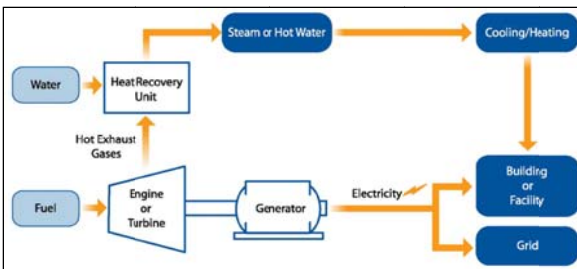
### ۱- مقدمه

تولید همزمان برق و حرارت (Combined Heating and Power)، یکی از فرایندهای مطرح صرفه‌جویی انرژی، در صنایع نیروگاهی، تولید توان و نفت و گاز محسوب می‌گردد. در این روش، برق و حرارت به‌صورت همزمان تولید شده و با کاهش اتلاف حرارت به محیط سبب افزایش کارایی کلی فرایند تولید توان می‌گردد. کارایی واحدهای نیروگاهی تولید برق در بهترین حالت بین ۳۵-۵۵ درصد است، درحالی‌که با این روش می‌توان به بازده کلی ۸۰-۹۰ درصد رسید. فرایند تولید همزمان (CHP) می‌تواند بر اساس استفاده از توربین‌های گاز، توربین بخار، موتورهای احتراقی، موتور استرلینگ، میکرو توربین‌ها و سلول‌های سوختی بنانهاده شده باشند و علاوه بر این امروزه استفاده از سیستم‌های تولید سه‌گانه همزمان (Combined Cooling and Heating and Power)، که علاوه بر برق و حرارت، بردت نیز تولید می‌کند، در مجتمع‌های مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی کاربرد روزافزونی یافته است.

حرارت اتلافی را با کمک نرم‌افزار هایسیس محاسبه و در ادامه برخی پارامترهای مؤثر موردبررسی قرار گیرد.

## ۲- موتور یا توربین‌های گازی با سیستم بازیافت حرارتی

توربین گازی یا موتور رفت و برگشتی در سیستم‌های CHP از سوختن گاز (گاز طبیعی یا بیوگاز) تولید الکتریسیته می‌کنند و در مرحله بعد حرارت خروجی از سیستم توسط قسمت بازیافت حرارت (HRS) گرفته می‌شود. این انرژی به شکل بخار یا آب داغ در سیستم‌های حرارتی مجاور استفاده می‌شود. از این رو این گونه سیستم‌های CHP را می‌توان در صنایع بزرگ و کوچک که نیاز به تأمین برق و حرارت به‌طور همزمان دارند استفاده کرد. در شکل (۱) طرح‌واره‌ای از یک سیستم تولید همزمان آورده شده است.



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از یک واحد تولید همزمان

استفاده از سیستم‌های تولید همزمان دارای مزایایی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به صرفه‌جویی در مصرف سوخت، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در محیط‌های شهری و صنعتی، کاهش اتلاف حرارت موجود در گاز داغ خروجی از محرک اولیه نظیر توربین‌های گازی که خود موجب افزایش راندمان انرژی می‌گردد و تأمین انرژی الکتریسیته باکیفیت بسیار بالاتر. شکل (۲) برتری سیستم تولید همزمان را از لحاظ راندمان نسبت به تولید جداگانه برق و حرارت نمایش می‌دهد. در ادامه ایستگاه تقویت فشار مورد مطالعه به‌طور اجمالی معرفی می‌گردد.

برق $\rightarrow$ ۲۶ نیروگاه $\rightarrow$ ۱۰۰ سوخت	حرارت $\rightarrow$ ۸۰ پولر $\rightarrow$ ۱۰۰ سوخت	$\frac{36 + 80}{200} = 0.58$ راندمان کلی
برق $\rightarrow$ ۳۰ واحد سیکل ترکیبی $\rightarrow$ ۱۰۰ سوخت	حرارت $\rightarrow$ ۵۵	$\frac{30 + 55}{100} = 0.85$ راندمان کلی

شکل ۲ مقایسه سیستم تولید همزمان از لحاظ راندمان نسبت به تولید جداگانه برق و حرارت

## ۳- ایستگاه تقویت فشار گاز طبیعی

وظیفه ایستگاه تقویت فشار گاز، فراهم آوردن فشار مناسب برای جریان یافتن دبی گاز طبیعی و غلبه بر افت فشار گاز در مسیر خط لوله است. گاز طبیعی عبوری از خطوط انتقال جهت فائق آمدن بر افت فشار ناشی از اصطکاک و یا تبادل حرارتی با محیط بیرون، از ایستگاه‌های افزایش فشاری که عمدتاً در فواصلی بیشتر از ۹۷ کیلومتر نصب گردیده‌اند عبور داده می‌شود. در این ایستگاه‌ها برای تولید گرادیان فشار و نگهداشتن جریان جرمی مورد نیاز در محل تحویل، از کمپرسورها استفاده می‌شود.

این فرایند از سه جزء اصلی کمپرسور، محفظه احتراق و توربین تشکیل شده است که کمپرسور وظیفه افزایش فشار گاز را بر عهده دارد، عملیات احتراق و افزایش دما نیز در محفظه احتراق انجام می‌شود و توربین که گازهای با دما و سرعت بالای خروجی از محفظه احتراق در آن وارد شده و ضمن

طریق خطوط توزیع در تمامی نقاط کشور) استفاده از پتانسیل موجود در گازهای داغ خروجی توربین‌های گاز این واحدها در راستای تأمین بخشی از حرارت، برودت و توان مکانیکی مورد نیاز، کمک شایانی به صرفه‌جویی انرژی در سطح کشور خواهد نمود.

اولین سابقه تاریخی استفاده از گرمایش مرکزی به قرن‌های سوم و چهارم پیش از میلاد بازمی‌گردد. تولید همزمان به مفهوم امروزی در اواخر ۱۸۸۰ در اروپا و آمریکا پدید آمد و در سال ۱۸۸۸ میلادی اولین واحد تولید همزمان برق و حرارت در آلمان شروع بکار نمود.

خالیک و کوشیک در سال ۲۰۰۴ یک سیستم تولید همزمان را که بر پایه توربین گاز در آن گرمایش مجدد صورت می‌گرفت، مدل‌سازی کرده و تأثیر پارامترهای عملکردی نظیر دمای نقطه پینچ را بر کارایی سیکل مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۴ کونگ، وانگ و هانگ مسئله را از دید یک کارفرما با هدف کاهش دوره بازگشت سرمایه برای یک موتور استرلینگ بررسی نمودند.

همچنین استفاده از توربین‌های گاز جهت بالا بردن توان نیروگاه‌های بخار برای اولین بار در سال ۱۹۴۶ مطرح شد و اولین تجربه بازیافت حرارت به‌وسیله انجام بازتوانی کامل به سال ۱۹۶۰ برمی‌گردد. هورلوک به معرفی و بررسی راهکارهای بهینه‌سازی سیکل توربین گاز پرداخته است و روابط ترمودینامیکی و نمودارهای عملکردی، انواع سیکل‌های عملی توربین گاز را که به‌صورت یک سیکل ساده فرض کرده بود، ارائه نموده؛ وی همچنین قسمت‌های بکار رفته در سیکل را از دیدگاه ترمودینامیکی به‌طور مجزا ارزیابی و بررسی کرد [۱]. کاراکاس و همکاران استفاده از حرارت اتلافی گازهای خروجی از توربین گاز را جهت افزایش توان تولیدی توربین گاز مطالعه کردند [۲]. پال کالینوفسکی و همکاران، استفاده از حرارت اتلافی در توربین گاز، به‌منظور تولید گرمایش توسط چیلر را برای مایع‌سازی گاز طبیعی مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۳]. پیلواجی روی اثربخشی مینی توربین‌ها و میکرو توربین‌های گاز کار کرده و چگونگی افزایش توان و مقایسه آن‌ها با سیستم‌های بزرگ را بررسی کرده است [۴]. وو-وانگ-لی روی سیستم‌های سه‌گانه میکرو کار کرده و ذخیره انرژی را بین CHP, CCHP بررسی کرده و نتیجه گرفت که ذخیره انرژی در سیستم CCHP نسبت به CHP تقریباً دو برابر می‌باشد [۵]. وانگ و شی روی بهبود عملکرد مدهای الکتریکی و حرارتی کار کرده‌اند [۶]. وانگ و ژنگ گاز خروجی از یک سیستم ترموالکتریک، در موتورهای احتراق داخلی را شبیه‌سازی و در ادامه پارامترهای مؤثر آن را بررسی کرده‌اند [۷]. لی و ژبا در تحقیق خود بهینه کردن مصرف در سیستم‌های کاهش  $CO_2$  تولیدی کارخانه‌ها را با پیاده‌سازی سیستم‌های CCHP بررسی کرده است [۸]. جدید نیز با در نظر گرفتن یک ساختمان مسکونی، در زمینه کاهش هزینه‌های انرژی و بهینه کردن منابع انرژی قابل دسترس مانند انرژی خورشید تحقیقاتی را صورت داده است [۹].

وو و یانگ در سال ۲۰۰۶ انواع سیستم تولید همزمان را مورد بررسی قرار داده و مشخصه‌های این سیستم‌ها را به‌طور اجمال بیان کرده‌اند [۱۰]. وو-وانگ در تحقیق خود تعریفی از سیستم‌های CCHP آورده و مزایای آن را بیان می‌کند؛ و در ادامه ویژگی‌های موجود در فناوری‌های CCHP به‌ویژه عملکردهای فنی نظیر کاربرد و توسعه و پیشرفت آن در سایزهای مختلف را ارائه کرده‌اند [۱۱].

در این مقاله نیز تلاش شده است که به‌عنوان نمونه استفاده از واحدهای تولید همزمان و بازیافت حرارتی را در یک ایستگاه تقویت فشار گاز مربوط به شهر قزوین بررسی شود. و میزان حرارت اتلافی، و میزان توان قابل‌برداشت از

مربوط به قانون اول ترمودینامیک، از نرم‌افزارهای مطرح در حوزه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پروسه‌های صنعتی و شیمیایی می‌باشد [۱۲].

#### ۲-۴- معادله حالت

در این تحقیق برای پیش‌بینی خواص ترموفیزیکی مخلوط هیدروکربن‌ها و نیتروژن از معادله حالت پینگ-رابینسون استفاده شده است [۱۳، ۱۴]. معادله حالت پینگ-رابینسون یک معادله حالت نیمه تجربی بوده و از نوع معادله‌های حالت مشتق شده از فرم واندروالس می‌باشد. فرم جبری این معادله حالت به صورت زیر است [۱۳، ۱۴]:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{aa}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $a$  و  $b$  ثابت‌های معادله حالت بوده و  $\alpha$  ضریب بدون بعد وابسته به دمای کاهیده می‌باشد. مقدار  $\alpha$  با توجه به فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $T_r$  دمای کاهیده است. در این رابطه، ضریب  $m$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$m = 0.3796 + 1.5422\omega - 0.2699\omega^2 \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\omega$  فاکتور خروج از مرکز نامیده می‌شود که مقادیر آن برای مواد مختلف در مرجع [۱۵] ذکر شده است. در این تحقیق از بانک اطلاعاتی نرم‌افزار هایسیس جهت محاسبه این فاکتور استفاده شده است.

ضرایب  $a$  و  $b$  در رابطه (۱) با استفاده از قیدهای نقطه بحرانی که به قیود واندروالس مشهور هستند، بدست می‌آیند [۱۴]. این قیود در نقطه بحرانی عبارت‌اند از:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T=T_c} = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_{T=T_c} = 0 \quad (5)$$

اگر این قیود را در رابطه (۱) اعمال کنیم، ضرایب  $a$  و  $b$  به صورت زیر بدست خواهد آمد [۱۴]:

$$a = \Omega_a \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad \Omega_a = 0.45724 \quad (6)$$

$$b = \Omega_b \frac{RT_c}{P_c} \quad \Omega_b = 0.07780 \quad (7)$$

#### ۳-۴- قیدهای مدل‌سازی

قیدها و ساده‌سازی در نظر گرفته شده در مدل‌های توسعه داده شده برای واحد بازیافت مورد مطالعه در این تحقیق عبارت‌اند از:

۱. افت فشار برای جریان سمت گاز بازیافت حرارتی مولد بخار تک فشاری بین ۱۹ تا ۳۰ میلی بار در نظر گرفته شده است و افت فشار در سمت جریان بازیافت حرارتی ۵٪ فشار ورودی می‌باشد. همچنین از افت فشار در سایر اجزا صرف نظر شده است [۱۶، ۱۷].

۲. کارایی توربین و پمپ ۸۰٪ در نظر گرفته شده است.

۳. مایع ورودی به مبدل بازیافت به صورت مایع متراکم ( $x=0$ ) و در خروجی از مبدل حرارتی به صورت بخار ( $x=1$ ) می‌باشد.

۴. تقاطع دمایی در مبدل رخ نمی‌دهد.

۵. تلفات حرارتی در مبدل‌های حرارتی ناچیز است.

۶. محدودیت‌های اقتصادی ساخت تجهیزات حرارتی، خوردگی شدید سطوح در صورت کاهش بیش‌ازحد و چگالش محصولات اسیدی احتراق و نیز محدودیت‌های زیست‌محیطی به جهت لزوم جریان بالارونده گاز خروجی،

انبساط، تولید کار می‌شود و با آن شفت کمپرسور به گردش درمی‌آید. در نهایت گاز خروجی از توربین با دمای بالا از دودکش خارج شده و به همراه خود انرژی زیادی را اتلاف می‌کند. در این تحقیق از میان ایستگاه‌های تقویت فشار گاز موجود در کشور، ایستگاه تقویت فشار قزوین انتخاب و در ادامه جزئیات آن آورده می‌شود.

#### ۳-۱- ایستگاه تقویت فشار گاز قزوین

ایستگاه تقویت فشار گاز قزوین دارای دو واحد توربوکمپرسور گازی (زیمینس)، هر واحد به ظرفیت ۲۵ مگاوات می‌باشد. مجموع ظرفیت انتقال گاز روزانه این واحد در حدود ۶۰ میلیون مترمکعب است. فشار گاز ورودی به ایستگاه ۴۶/۲ بار تا ۵۱/۷ بار و فشار خروجی ۶۸/۹۵ بار تا ۷۲/۴ بار است. گاز بعد از پالایش شدن و تقلیل فشار آن به حدود ۱۳/۸ بار به مصرف توربین‌ها می‌رسد. هوای لازم برای احتراق سوخت توسط یک کمپرسور جریان محوری بعد از عبور از یک سیستم تمیزکننده تأمین می‌گردد. در محفظه احتراق، سوخت به طور پیوسته از طریق مشعل‌ها، به منظور سوختن با هوا، تزریق می‌شود. گرمای حاصل از احتراق سوخت گازی به گونه‌ای آزاد می‌گردد که گاز منبسط شده و جریان هموار و یکنواختی از گازهای گرم در تمام شرایط کاری تأمین می‌گردد. و محصولات احتراق وارد توربین می‌شوند. اصول عملکرد توربین بدین صورت است که در عبور جریان محصولات احتراق از فضای همگرای بین پره‌های راهنما، گازهای داغ منبسط شونده، فشار به سرعت تبدیل شده و سیال عامل شتاب می‌گیرد. هنگامی که گازهای داغ با سرعت بالا به تیغه‌ها روتور توربین برخورد می‌نماید انرژی موجود در جریان سیال به تیغه‌ها منتقل گردیده و باعث می‌گردد تا توربین به گردش درآید و در نتیجه توان لازم جهت راندن شفت توربین فراهم می‌شود. در نهایت محصولات احتراق با دمای بالا از توربین خارج می‌گردد.

لازم به ذکر است که در این تحقیق تمرکز بیشتر بر روی بررسی انرژی موجود در گاز داغ خروجی از توربین‌ها می‌باشد. بدین منظور در ادامه با توجه به اطلاعات مربوط به فشار، دما، ترکیب گاز خروجی و دبی آن و با استفاده از نرم‌افزار اسپین هایسیس به مدل‌سازی جریان انرژی گازهای خروجی می‌پردازیم.

#### ۴- شبیه‌سازی واحد تولید همزمان برق و حرارت

همان‌گونه که در بخش‌های قبلی بیان گردید هدف این تحقیق مدل‌سازی فرایند تولید همزمان و بررسی پارامترهای کلیدی آن می‌باشد. در این راستا بعد از معرفی نرم‌افزار هایسیس و بیان قیدهای حاکم بر مسئله، واحد تولید همزمان را مدل و سپس مورد بررسی قرار می‌دهیم. بازیافت حرارتی مولد بخار (HEAT RECOVERE STEAM GENERATOR) یک مبدل حرارتی پیوسته-لوله می‌باشد که جریان گرم آن از قسمت پیوسته عبور می‌کند و در سمت دیگر مبدل آب مایع اشباع وارد و بخار فوق داغ از آن خارج می‌گردد.

#### ۴-۱- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی واحدهای بازیافت حرارت و تولید همزمان مورد مطالعه از نرم‌افزار اسپین‌هایسیس نسخه ۷،۲ استفاده شده است. نرم‌افزار اسپین‌هایسیس به دلیل داشتن معادله حالت‌های مناسب برای کاربردهای گوناگون، تعریف اغلب المان‌های مورد نیاز شبیه‌سازی، وجود واحدهای کنترلی برای کنترل قسمت‌های مختلف، افزایش سرعت عملیات مدل‌سازی و بهینه‌سازی به دلیل انجام محاسبات

بیشینه دور توربین شاهد بیشینه دمای گاز خروجی خواهیم بود و عکس آن نیز در مورد کمینه دور صادق می‌باشد.

در ادامه این بخش اطلاعات موردنیاز برای دو حالت بیشینه و کمینه دور، در قالب جداول ۱ و ۲ آورده شده است. البته بیان این نکته ضروری است که با توجه به نزدیکی مقادیر محاسبه‌شده برای درصد ترکیب گاز خروجی و برای سادگی کار فرض ثابت بودن درصد ترکیب گاز خروجی برای هر دو حالت توربین در نظر گرفته‌شده و همچنین از مقادیر ناچیز صرف‌نظر شده است. دیگر اینکه با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش ۴-۴، برای شبیه‌سازی، دبی ورودی را دو برابر مقدار ارائه‌شده در جدول ۱ در نظر می‌گیریم.

**جدول ۱** اطلاعات مربوط به گاز داغ خروجی (اگزاست) در دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین

مقادیر اندازه‌گیری شده	بیشینه دور توربین	کمینه دور توربین
دور توربین	۷۲۰۰ rpm	۵۵۰۰ rpm
دمای گاز داغ خروجی (دمای اگزاست)	۶۱۰C	۴۸۰C
فشار گاز داغ خروجی (فشار اگزاست)	۸۰ kPa	۷۸/۸kPa
دبی جرمی گاز داغ خروجی (دبی جرمی اگزاست)	۸۰/۴Kg/s	۷۸/۴Kg/s
دمای محیط در هنگام اندازه‌گیری	۱۲C	۱۲C

**جدول ۲** درصد ترکیب اجزای گاز داغ خروجی (اگزاست)

اجزای گاز داغ خروجی (اگزاست)	درصد ترکیب جرمی (%)
اکسیژن	۱۶/۳۰
دی‌اکسید کربن	۱/۱
نیتروژن	۸۱/۷
آب	۰/۹

#### ۵- مقایسه بازیافت حرارت در دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین

در این بخش با توجه به اطلاعات، فرضیات و معادله حالت ارائه‌شده در بخش ۴، بازیافت حرارت در دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین محاسبه‌شده و تأثیر تغییر برخی از پارامترها در میزان بازیافت حرارت به صورت نموداری مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

#### ۵-۱- میزان حرارت دریافتی

در ادامه فقط بخشی از چرخه ارائه‌شده در شکل (۳) که شامل مبدل حرارتی (مبدل پوسته لوله) می‌باشد و در شکل (۴-الف) آمده، مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش نوع سیال عاملی که حرارت را دریافت می‌نماید در نتیجه محاسبات تأثیری نداشته و امکان این کار نیز وجود دارد که در فضای نرم‌افزار مبدل حرارتی با یک خنک‌کننده جایگزین شود و با توجه به شروط ارائه‌شده در بخش‌های قبلی (حداکثر کاهش دما باید ۱۰۰ سانتی‌گراد از دمای محیط بیشتر باشد)، در این محاسبات فرض شده است که گاز داغ خروجی در هر دو حالت تا دمای ۱۱۲ درجه سانتی‌گراد سرد می‌گردد. مقادیر محاسبه‌شده برای دو حالت کمینه و بیشینه دور توربین به ترتیب ۶۲/۴۵

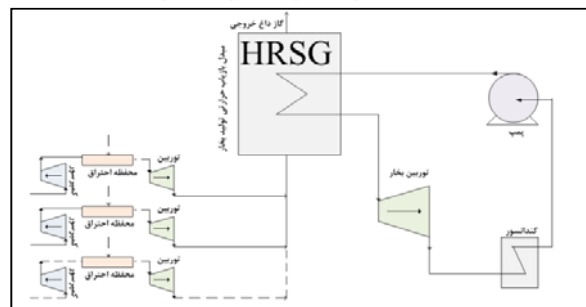
موجب این امر می‌گردد که دمای گازهای خروجی از بازیافت را تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای محیط نگه‌داشته شود، که این موضوع باعث تخلیه مقداری از انرژی به محیط می‌گردد.

#### ۴-۴- بررسی چیدمان پیشنهادی جهت ایجاد سیکل ترکیبی توربین گاز

از نقطه نظر تئوریک چیدمان‌های گوناگونی را می‌توان در ایجاد سیکل ترکیبی توربین گاز و بخار ایجاد نمود، که هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. به‌طور مثال در ساده‌ترین چیدمان‌ها می‌توان با استفاده از یک بازیافت حرارتی مولد بخار و با کمک یک توربین بخار تک فشاری، تا حدی زیادی انرژی و انرژی موجود در گازهای خروجی سیکل توربین گاز را بازیافت نمود. در نیروگاه‌های بزرگ سیکل ترکیبی سطوح فشار مولد بخار و توربین‌های بخار معمولاً شامل دو یا سه مرحله فشار بالا (HP)، فشار میانی (IP) و کم‌فشار (LP) افزایش می‌یابد. مزیت افزایش تعداد سطوح فشار، کاهش اختلاف دما جریان‌های سیال عبوری یا همان نقطه پینچ در مبدل‌های حرارتی است. اما در تأسیسات تقویت فشار گاز به دلیل کوچک بودن توربین‌های گاز، محدودیت فضای نصب به دلیل پایپینگ پیچیده تأسیسات، عدم صرفه اقتصادی برای ایجاد سیکل‌های پیچیده بخار و محدودیت‌های بهره‌برداری، استفاده از سیکل بخار ساده تک فشاری نسبت به دیگر طرح‌ها برتری دارد.

در این طرح صرفاً از گازهای داغ خروجی واحدهای توربین گاز جهت تأمین گرمای ورودی به سیکل بخار پایین‌دستی استفاده می‌شود (لازم به ذکر می‌باشد که با توجه به شکل (۳) از سه توربین گاز موجود در ایستگاه تقویت فشار، همواره دوتای آن‌ها در حال کار بوده و یکی در حالت آماده‌باش می‌باشد. در نتیجه همواره با دو خروجی گاز داغ مواجه هستیم)، بدین صورت که مانند شکل (۳) کلیه واحدها، دود خروجی خود را به یک هدر تحویل می‌دهند و سپس با عبور این گازهای داغ از یک بازیافت حرارتی تولید بخار (HRSG) انرژی لازم به سیکل بخار منتقل می‌شود و گازهای با دمای و گرمای بسیار کمتر از زمان خروج از توربین به اتمسفر تخلیه می‌گردد.

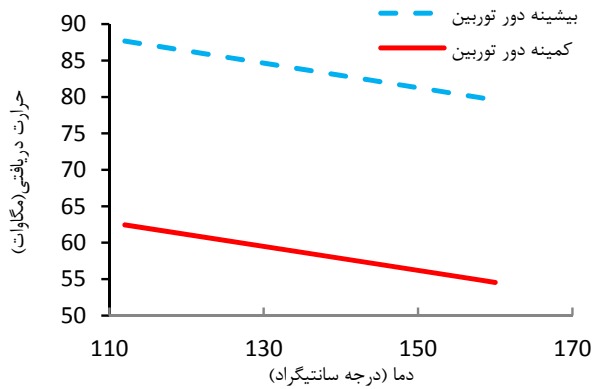
در ادامه ابتدا میزان انرژی حاصله از گاز داغ خروجی برای دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین محاسبه می‌گردد و پس از آن قسمت تولید توان چرخه مورد بررسی قرار می‌گیرد، البته پیش‌ازین کار ابتدا اطلاعات مورد نیاز شبیه‌سازی نظیر دما، فشار و دبی گاز داغ خروجی بیان می‌گردد.



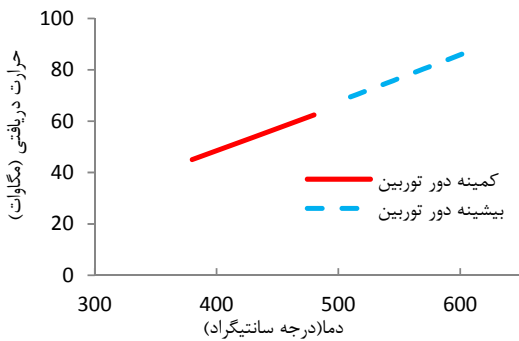
شکل ۳ طرح‌واره‌ای از یک واحد بازیافت حرارتی تولید بخار (HRSG) تک فشار

#### ۴-۵- مشخصات گاز داغ خروجی در دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین‌های واحد تقویت فشار قزوین

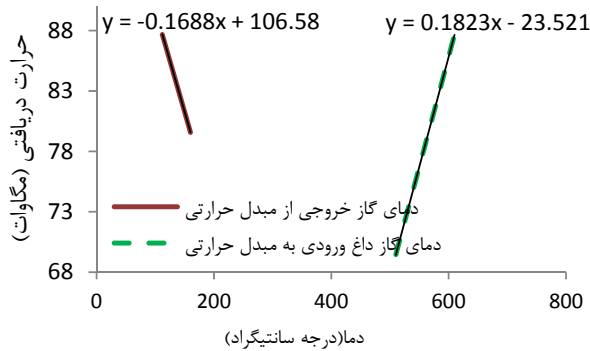
بیشترین دور توربین‌های موجود در ایستگاه تقویت فشار قزوین ۷۲۰۰ دور بر دقیقه و کمترین دور، ۵۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. در نتیجه شرایط توربین همواره بین این دورها تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که در حالت



شکل ۵ تأثیر افزایش دمای گاز خروجی بر کاهش حرارت دریافتی



شکل ۶ تأثیر تغییرات دمای ورودی به مبدل حرارتی در حرارت دریافتی

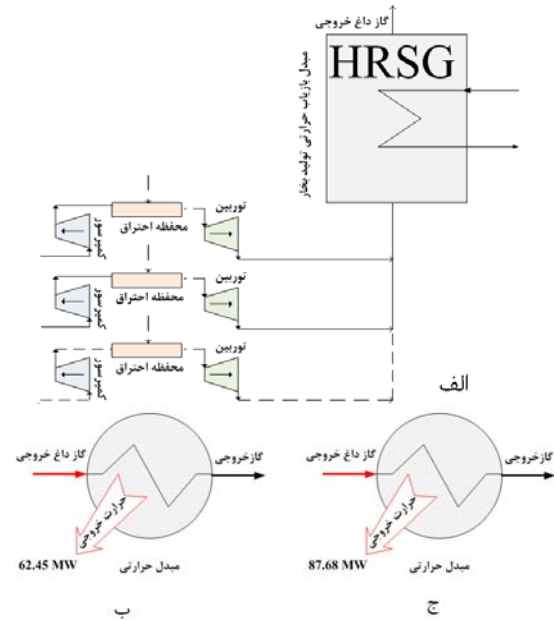


شکل ۷ بررسی حساسیت حرارت دریافتی نسبت به دمای اگزاست در ورودی و خروجی مبدل حرارتی

#### ۶- بررسی واحد بازیافت حرارتی تولید بخار (HRSG) تک‌فشاره

در بخش‌های پیشین، تمرکز بیشتر بر بررسی میزان حرارتی دریافتی (حرارت خروجی از جریان گرم مبدل حرارتی) بود و همان‌گونه که ملاحظه کردید میزان حرارت را در دو حالت بیشینه و کمینه دور توربین محاسبه گردید و برخی نمودارها نیز برای فهم بیشتر موضوع ارائه گردید. در ادامه، واحد بازیافت حرارتی تولید بخار (HRSG) مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این فرایند یکی از واحدهای پیشنهادی برای بکارگیری در کشور و همچنین استان قزوین می‌باشد. بدین منظور فرایند فوق‌الذکر برای حالت بیشینه دور توربین و با توجه به اطلاعات موجود در مقالات و برخی پایان‌نامه‌های مرتبط (بخصوص برای سمت جریان تولید توان) مدل‌سازی شده

مگاوات و ۸۷/۶۸ مگاوات محاسبه شده و دیاگرام انرژی مبدل حرارتی در قالب شکل‌های (۴-ب) و (۴-ج) آورده شده است.



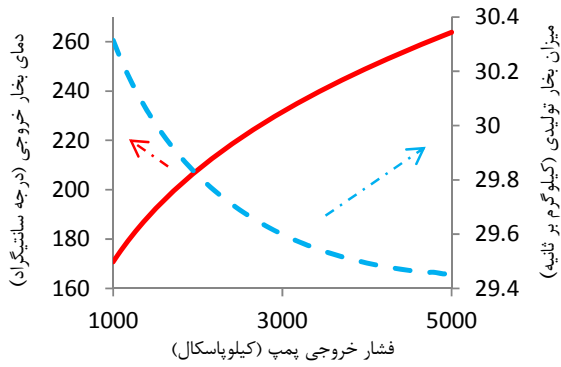
شکل ۴ الف) مبدل حرارتی بازیافت ب) دیاگرام انرژی در حالت کمینه دور توربین ج) دیاگرام انرژی در حالت بیشینه دور توربین

#### ۵-۲- بررسی تأثیر تغییر دمای گاز خروجی از مبدل (HRSG) بر میزان حرارت دریافتی

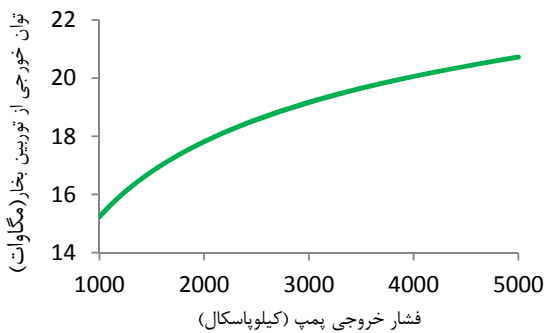
همان‌گونه که در بخش قبل مشاهده کردید هنگامی که دمای گاز خروجی از مبدل ۱۱۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود حرارت بیشتری نسبت به دماهای بالاتر از آن تولید می‌گردد؛ با این وجود در نظر گرفتن دمای ۱۱۲ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان یکی از پارامترهای طراحی احتمال بروز مشکلاتی نظیر خوردگی شدید سطوح در صورت کاهش بیش‌ازحد دما و چگالش محصولات اسیدی احتراق را در پی دارد. در نتیجه در این بخش تأثیر افزایش دمای خروجی بر میزان کاهش حرارت خروجی از گاز داغ بررسی شده و در غالب شکل (۵) آورده شده است.

#### ۵-۳- بررسی دمای گاز داغ ورودی به مبدل (HRSG) و مقایسه آن با تغییرات دمای گاز خروجی

یکی دیگر از پارامترهای کلیدی در مبحث بازیافت حرارت دمای گاز داغ ورودی به مبدل بازیافت می‌باشد که این مقدار تحت عواملی نظیر تغییر دور توربین تغییر می‌کند. در این بخش ابتدا تأثیر تغییرات دمای گاز داغ ورودی به مبدل بررسی شده است، شکل (۶)؛ در ادامه این بخش حساسیت حرارت دریافتی نسبت به دمای گاز داغ ورودی و خروجی از مبدل حرارتی (HRSG) در حالت بیشینه دور توربین به‌صورت نموداری مقایسه شده و نتایج نشان می‌دهد که قدر مطلق شیب نمودار در تغییرات دمایی گاز خروجی از مبدل حرارتی از قدر مطلق شیب نمودار در تغییرات دمای گاز ورودی به مبدل حرارتی بیشتر است که این امر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر حرارت دریافتی به تغییرات دمای خروجی است.



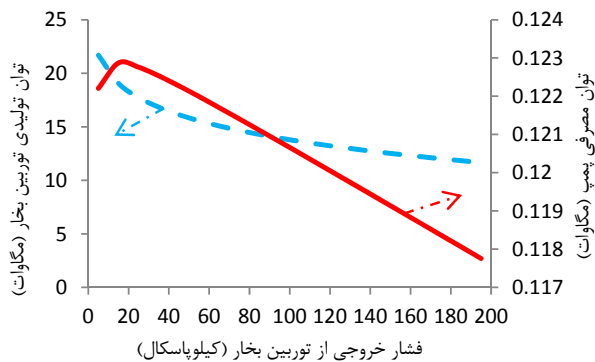
شکل ۹ بررسی تأثیر تغییر فشار خروجی پمپ بر دمای بخار خروجی از مبدل حرارتی و میزان آن



شکل ۱۰ بررسی تأثیر تغییر فشار خروجی پمپ بر میزان توان تولیدی توربین بخار

### ۶-۲- بررسی تأثیر تغییر فشار خروجی توربین بخار بر عملکرد فرایند بازیافت حرارت

تغییر فشار خروجی توربین بخار به صورت مستقیم بر میزان بخار تولیدی و دمای آن تأثیر نمی‌گذارد، اما بیشترین تأثیر آن ابتدا بر روی تولید توان توربین و سپس توان مصرفی پمپ می‌باشد که در شکل (۱۱) رسم شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشخص است با افزایش فشار خروجی توربین بخار، توان تولیدی توربین همواره کاهش می‌یابد؛ اما در مورد توان مصرفی پمپ در ابتدا و تا مقادیر نزدیک به فشار ۲۰ کیلو پاسکال نمودار روند صعودی داشته و پس‌از آن با افت شدیدی روبرو می‌گردد. از آنجایی مقادیر مربوط به توان مصرفی پمپ در مقایسه با توان تولیدی توربین خیلی کمتر می‌باشد؛ در نتیجه باید تا جای ممکن فشار خروجی توربین را کاهش داد.

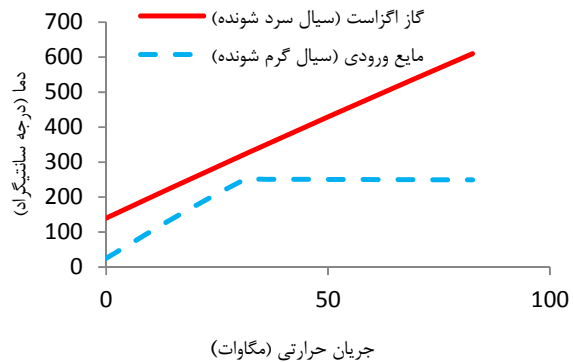


شکل ۱۱ بررسی تأثیر تغییر فشار خروجی توربین بخار بر نحوه عملکرد توربین و پمپ

است. همچنین برخی اطلاعات مورد جریان تولید توان در قالب جدول (۳) ارائه گردیده است. عملکرد فرایند بدین گونه است که آب که ابتدا توسط پمپ افزایش فشار پیدا کرده است وارد قسمت لوله‌ای مبدل حرارتی پوسته-لوله می‌گردد و توسط گاز داغی که در اطراف لوله‌ها و در قسمت پوسته مبدل جریان دارد گرم شده تا اینکه به حالت بخار (بخار مافوق گرم) می‌رسد که منحنی حرارتی مربوط به سرد شدن گاز اگزاست و گرم شدن آب در مبدل حرارتی در شکل (۸) آورده شده است، در ادامه بخار مبدل را ترک کرده و به سمت توربین می‌رود و در این قسم تولید کار (توان) می‌نماید؛ حال بخار اشباع که دما و فشارش کاهش یافته برای خنک شدن بیشتر به کندانسور فرستاده شده و بدین صورت چرخه ادامه می‌یابد. در ادامه تحقیق برخی پارامترهای مهم فرایند مورد بررسی قرار می‌گیرد

جدول ۳ پارامترهای پایه جریان تولید توان در فرایند بازیافت حرارتی

مقادیر	پارامتر
۱۰ kPa	فشار بخار آب ورودی به کندانسور
۴۰۰ kPa	فشار آب خروجی از پمپ
۲۵C	دمای خروجی کندانسور
۲۰۰ kPa	افت فشار در قسمت لوله مبدل



شکل ۸ منحنی حرارتی مربوط به جریان گاز داغ (اگزاست) و مایع ورودی به مبدل حرارتی

### ۶-۱- بررسی تغییرات فشار مایع ورودی به مبدل حرارتی و تأثیر آن بر دما و میزان بخار تولیدی

فشار مایع ورودی به مبدل حرارتی یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرایند بازیافت است که تغییر آن بر دمای بخار تولیدی و میزان آن تأثیرگذار است با توجه به پیشنهادهای ارائه شده این فشار در ابتدا ۴۰ بار در نظر گرفته شده بود، در این بخش بررسی می‌شود که در صورت افزایش و یا کاهش این فشار فرایند با چه تغییراتی مواجه می‌گردد، شکل (۹).

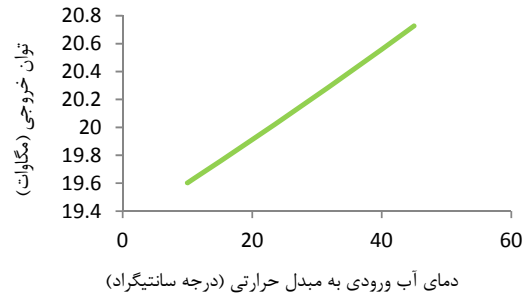
همان‌گونه که از شکل (۹) قابل مشاهده است با افزایش فشار خروجی پمپ میزان بخار تولیدی کاهش می‌یابد اما بر دما بخار افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر بخار مافوق گرم‌تر شده و توانایی تولید کار بیشتری دارد، از طرفی میزان بخار نیز در قابلیت تولید کار (توان خروجی توربین بخار) مؤثر می‌باشد؛ اما اگر بیشتر دقت کنید در پی تغییر ۴۰ باری فشار میزان تغییر دبی به قدری کم بوده که در مقابل افزایش دما قابل صرف نظر است، شکل (۱۰). در نتیجه فشار ۴۰ بار یا بیشتر (البته با توجه به استحکام تجهیزات مبدل حرارتی و انتقال فشار) قابل قبول می‌باشد.



- [5] Jing-yi Wu\*, Jia-long Wang, Sheng Li, Multi-objective optimal operation strategy study of micro-CCHP system. (2012), 48, 472-483.
- [6] Yang Shi, Qing H. Wang, A Novel Optimal Operational Strategy for the CCHP System Based on Two Operating Modes. IEEE, MAY 2012, 27, NO. 2, 1032-1041.
- [7] J.L. Wang, J.Y. Wu, C.Y. Zheng Simulation and evaluation of a CCHP system with exhaust gas deep-recovery and thermoelectric generator. Elsevier, 2014, 86, 992-1000.
- [8] Yajun Li n, Yan Xia. DES/CCHP: The best utilization mode of natural gas for China's low carbon economy. 2013, 53, 477-483.
- [9] Jadid Shahram & Brahmam Faeze. Optimal Energy Management of Hybrid CCHP and PV in a Residential Building. IEEE, 2014, 978, 19-24.
- [10] Wongvisanupong, Kanet, and Naebboon Hoonchareon. Optimal Scheduling of Hybrid CCHP and PV Operation for Shopping Complex Load. IEEE, 2013, 978, 4-13.
- [11] D.W. Wu, R.Z. Wang, Combined cooling, heating and power: A review, Elsevier, 2006, 32, 459-495.
- [12] HYSYS Process Simulation, Hyprotech Ltd., Version 7.2, 2010.
- [13] A. Danesh, PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids, Vol. 47, Elsevier, 1998.
- [14] T. Ahmed, Equation of state and PVT analysis: applications for improved reservoir modeling, Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2007.
- [15] R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling, The properties of gases and liquids, Fourth edition, McGrawHill, 1987.
- [16] Boyce Meherwan P. (2001), Gas Turbine Engineering Handbook, Second Edition, Butterworth-Heinemann.
- [17] Boyce Meherwan P. (2002) Handbook For Cogenerations And Combined Cycle power plants, New York, NY 10016.

### ۳-۶- بررسی دمای آب ورودی به مبدل حرارتی

این پارامترهای در واحدهای بازیافت حرارت تأثیرگذار می‌باشد. و باعث افزایش توان خروجی توربین می‌گردد، شکل (۱۲)، اما تأثیر آن به اندازه تأثیر تغییر فشار خروجی پمپ نیست. البته لازمه مقایسه دو پارامتر غیر هم‌جنس نظیر فشار و دما، استفاده از آنالیز حساسیت بی‌بعد می‌باشد که در تحقیقات بعدی به آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۱۲ بررسی تأثیر تغییر دمای آب ورودی به مبدل حرارتی در توان تولیدی توربین

### ۷- نتیجه‌گیری

افزایش روزافزون مصرف گاز طبیعی در کشور از یک سو و نیاز کشور به ارائه روش‌های زودبازده جهت صرفه‌جویی انرژی از سوی دیگر موجب توجه بیش‌ازپیش به واحدهای تولید هم‌زمان و بازیافت حرارتی شده است. در این تحقیق فرایند بازیافت حرارتی تولید بخار (HRSG) تک فشار به‌عنوان یکی از فرایندهای پایه‌ای، ساده و درعین‌حال کاربردی در ایستگاه‌های تقویت فشار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که یک ایستگاه تقویت فشار ۵۰ مگاواتی نزدیک به ۹۰ مگاوات اتلاف انرژی دارد که با استفاده از واحدهای بازیافت می‌توان تا حد زیادی از این اتلاف‌ها جلوگیری کرد. در قسمت بعدی پس از معرفی فرایند تولید، توان تعدادی از پارامترهای کلیدی نظیر فشار بیشینه و کمینه چرخه تولید توان و دمای آب ورودی به مبدل بازیافت واحدها در شرایط کاری مورد نظر تحقیق حاضر بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فشار خروجی پمپ و دمای آب ورودی به مبدل بازیافت موجب افزایش توان خروجی توربین از طرفی بررسی دقیق‌تر نمودارها نشان دهنده تأثیر بیشتر پارامتر فشار خروجی پمپ (یا همان فشار حداکثری چرخه) بر توان تولیدی چرخه بخار می‌باشد.

### ۸- قدردانی

از شرکت انتقال گاز ایران، ایستگاه تقویت فشار گاز قزوین که در تهیه این تحقیق مرا یاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

### ۹- مراجع

- [1] Horlock, J.H, (2003), Advanced Gas Turbine Cycles, First edition, Cambridge, U.k.
- [2] Karakas E., Doukelis A., Leithner R., Aronis N., "Combined Cycle Power Plant with Integrated Low Temperature Heat (LOTHECO)", Applied Thermal Engineering, No. 24, 2004, pp. 1677-1686
- [3] kalinowski P., Y., Radermacher R., "Application of Waste Heat Powered Absorption Refrigeration System to the LNG Recovery Process", International Journal of Refrigeration, No. 32, 2009, pp. 687-694.
- [4] P.A. Pilavachi. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. Elsevier, 2002, 22, 2003-2014.