



بررسی عملکرد توربین گاز تک محوره و روشهای افزایش راندمان و توان خروجی آن

مهدی بهزاد^۱، سیامک کاظم زاده حنانی^۲، امیرحسین کاکایی^۳، اسماعیل محمدی نور^۴، مجید آقابابائی^۵

^۱ عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

^۲ آزمایشگاه سیالات دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

^۴ کارشناس تحقیقات فنی پژوهش و توسعه پتروشیمی رازی

^۵ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

بررسی عملکرد توربینهای گازی جهت بهره برداری بهینه از آن امروزه در مراکز تحقیقاتی دنیا اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. با توجه به اینکه جریان سیال در توربینهای گازی دارای سرعت و دمای زیادی می باشد، لذا عملکرد دستگاه نسبت به پارامترهای مختلف حساسیت زیادی دارد. این حساسیت ایجاب می کند جهت افزایش راندمان (کاهش مصرف سوخت)، افزایش طول عمر قطعات و کاهش آلودگی محیط، عملکرد توربین گاز مورد ارزیابی دقیق قرار بگیرد. در این پروژه یک نمونه واقعی (توربین گاز ۲ پتروشیمی رازی واقع در بندر ماهشهر) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله پس از آنالیز حساسیت بروی دستگاه، میزان تاثیر گذاری پارامترهای مختلف بر عملکرد تعیین و مقایسه شده است. در ادامه عملکرد اجزاء مختلف از جمله کمپرسور و توربین مورد ارزیابی قرار گرفته و تاثیر بهره برداری بار کم بر عملکرد آن بررسی شده است. در پایان با توجه به تاثیرگذاری شرایط محیطی بر عملکرد دستگاه، روشهای خنک کردن هوای ورودی مورد ارزیابی فنی-اقتصادی قرار گرفته و با توجه به هزینه سوخت مصرفی بهترین راه جهت افزایش راندمان و توان خروجی توربین های گازی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: ۱- توربین گاز ۲- عملکرد ۳- خنک کننده

۱- مقدمه

توربین گاز ۲ پتروشیمی رازی در سال ۱۹۷۵ ساخته شده و مشخصات آن در دو دمای مختلف محیط و فشار هوای ۱۴،۷ PSI (همتراز سطح دریا) با سوخت گاز طبیعی در جدول (۱) آورده شده است.



جدول ۱- مشخصات توربین گاز ۲ پتروشیمی رازی

راندمان (%)	نرخ حرارت Btu/KW-HR	توان حاصل خروجی KW	دمای محیط °F	نوع عملکرد
۲۴,۳	۱۴۰۴۰	۱۵۴۷۰	۸۰	نرمال
۲۴,۷	۱۳۷۸۰	۱۶۶۳۰	۸۰	اوج
۲۲	۱۵۱۶۰	۱۲۷۵۰	۱۱۸	نرمال
۲۲,۴	۱۴۸۸۰	۱۳۷۳۰	۱۱۸	اوج

مشاهده می شود که توربین گاز مذکور بدون مبدل حرارتی بوده و در دمای محیط $80^{\circ}F$ دارای راندمان طراحی ۲۴,۳٪ می باشد و انرژی خروجی از آگزوز بدون استفاده به محیط منتقل می شود. در صورتیکه توربینهای گازی مشابه همراه با مبدل حرارتی دارای راندمان حرارتی حدود ۳۰٪ می باشند.
توان خروجی که در سالهای اخیر از آن گرفته می شود بین ۲ الی ۷ مگاوات بوده و راندمان آن کمتر از راندمان طراحی می باشد که دلایل آن در قسمتهای بعد بطور کامل مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- آنالیز حساسیت و تعیین پارامترهای موثر

می توان تابع عملکرد را به صورت $F = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ نمایش داد که متغیرهای x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای فیزیکی هستند که رفتار سیستم را تعریف می کنند. در بررسی تغییرات تابع F بر اثر تغییر متغیر x_i فرض می کنیم بقیه متغیرها ثابت باشند. پس تابع F به صورت زیر بیان می شود.

$$f(x_i) = F(x_{10}, x_{20}, \dots, x_i, \dots, x_{n0})$$

که اندیس 0 به معنای ثابت بودن آن متغیر می باشد. پارامتر حساسیت به صورت زیر تعریف می شود [۳].

$$\phi_{fi} = \frac{\frac{d[f(x_i)]}{f(x_i)}}{\frac{dx_i}{x_i}} = \frac{x_i}{f(x_i)} \cdot \frac{d[f(x_i)]}{dx_i} \quad (1)$$

تابع ϕ_{fi} میزان حساسیت تابع f نسبت به متغیر x_i را بیان می کند. این کمیت بی بعد بیشتر از مشتق تابع f نسبت به x_i می تواند حساسیت را بیان کند.

جهت سهولت کار می توان پارامتر ϕ_{fi} را از روش های عددی به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\phi_{fi} = \frac{\frac{\Delta f}{f(x_i)}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} \quad (2)$$

که در آن: $\Delta x_i = x_{i1} - x_i$, $\Delta f = f(x_{i1}) - f(x_i)$



باید توجه کرد که Δx_i تا آنجا که ممکن است باید کوچک باشد.

عملکرد توربین گاز توسط دو کمیت بصورت زیر بیان می شود: [۳]

$$\phi_{wi} = \frac{x_i}{W} \cdot \frac{dW}{dx_i}, \quad \phi_{\eta i} = \frac{x_i}{\eta} \cdot \frac{d\eta}{dx_i} \quad (3)$$

با توجه به رابطه $\eta = \frac{W}{m_f LHV}$ این دو پارامتر بصورت زیر به هم مربوط می شوند [۳]:

$$\phi_{\eta i} = \phi_{wi} - \frac{x_i}{m_f} \frac{dm_f}{dx_i} - \frac{x_i}{LHV} \frac{dLHV}{dx_i} \quad (4)$$

متغیرهایی که در عملکرد توربین گاز تأثیر می گذارند به شرح زیر می باشند:

\dot{m}_1 دبی هوای ورود به کمپرسور

T_1 دمای ورودی به کمپرسور

\dot{m}_c دبی هوای خنک کاری توربین

T_3 دمای خروج از محفظه احتراق

η_{pe} راندمان پلی تروپیک توربین

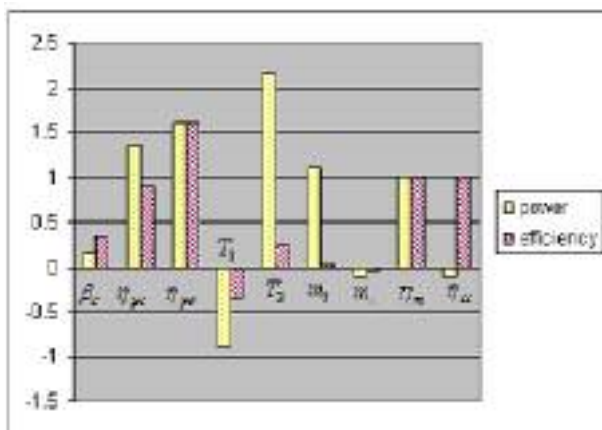
η_{cc} راندمان محفظه احتراق

η_{pc} راندمان پلی تروپیک کمپرسور

η_m راندمان مکانیکی توربین گاز

β_c نسبت فشار کمپرسور

پارامتر حساسیت برای توان خروجی و راندمان توربین گاز رازی بر حسب متغیرهای فوق در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- پارامتر حساسیت برای توان خروجی و راندمان

از این نمودار مشاهده می شود که عملکرد توربین های گازی به پارامترهایی مثل دمای ورودی به کمپرسور، دمای ورود به توربین، راندمان کمپرسور و توربین، دبی هوای ورودی، راندمان مکانیکی و راندمان محفظه احتراق حساسیت زیادی دارد. و بر عکس به پارامترهایی مثل نسبت فشار کمپرسور و دبی هوای خنک کاری پره های توربین حساسیت کمی دارد. البته میزان این



حساسیت برای کار خالص خروجی و راندمان حرارتی یکسان نیست. از آنجا که راندمان محفظه احتراق فقط هنگام طراحی قابل تغییر است، و پس از ساخت دستگاه و در هنگام بهره برداری تغییر چندانی نمی یابد، لذا به آنالیز عملکرد دستگاه مذکور نسبت به راندمان محفظه احتراق نیازی نمی باشد. به عبارت دیگر می توان از بررسی این پارامتر صرف نظر کرد. مشاهده می شود بیشترین تاثیر راندمان ورودی به توربین دارد. در واقع با افزایش دمای ورودی به توربین به نقطه طراحی نزدیک می شویم که به سرعت توان و راندمان افزایش میابد. همچنین از آنجا که در توربوژنراتورها در هنگام بارگذاری دور ثابت می باشد، دبی هوای ورودی نیز تغییر چندانی نمی یابد. آن اندک تغییر هم بواسطه تغییر دمای ورودی و راندمان کمپرسور و توربین بوجود می آید (بر اثر جرم گرفتگی، سائیدگی و ...)

از اطلاعات کاری روزانه مشاهده شد که دمای روغن روغنکاری در محدوده مجاز می باشد. وضعیت یاتاقانهای محور اصلی نیز مطلوب بوده و به موقع تعویض می شوند. لذا راندمان مکانیکی نیز برای توربین های گازی ۱ و ۲ تغییر محسوسی نداشته است. در نتیجه تنها پارامترهای مؤثر و قابل تغییر برای توربین های گازی ۱ و ۲ تغییر محسوسی نداشته است:

۱- راندمان کمپرسور و توربین

۲- دمای ورود به کمپرسور (دمای محیط)

۳- دمای ورود به توربین (اثر بهره برداری در بار کم)

اثرات پارامتر ۱ در بخش ۳ و اثرات پارامتر ۲ در بخش ۵ و اثرات پارامتر ۳ در بخش ۶ مورد بررسی قرار می گیرد.

۴- اثر کاهش کیفیت کمپرسور و توربین

هر گونه خرابی کمپرسور و توربین باعث کاهش کارایی توربین گاز خواهد شد. در این قسمت اثرات خرابی کمپرسور و توربین روی کارایی سیکل مورد بررسی قرار می گیرد. خرابیهای مورد بررسی به شرح ذیل می باشند:

۱- جرم گرفتگی کمپرسور

۲- سائیدگی کمپرسور

۳- کاهش راندمان ایزنتروپیک کمپرسور

۴- جرم گرفتگی توربین

۵- سائیدگی توربین

۶- کاهش راندمان ایزنتروپیک توربین

۷- جرم گرفتگی همزمان کمپرسور و توربین

۸- سائیدگی همزمان کمپرسور و توربین

۹- کاهش راندمان همزمان کمپرسور و توربین.

پارامتر Γ بصورت زیر تعریف میشود: [۴]

$$\Gamma = \frac{m\sqrt{Ti}}{PA} = \text{ثابت} \quad (5)$$

در این بررسی فرض شده است که راندمان هر مؤلفه به هر دلیل از جمله تیز شدن نوک پره ها یا برخورد اجرام خارجی (FOD) کاهش می یابد.

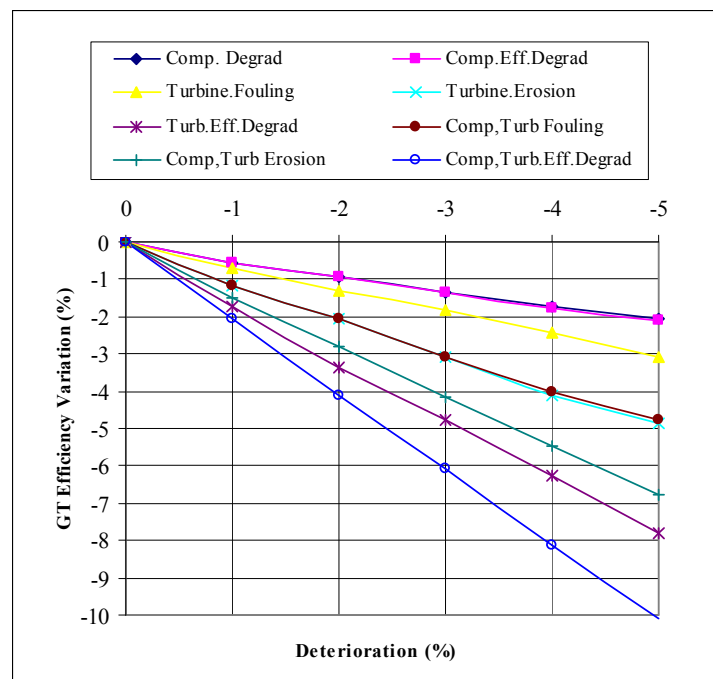


در جدول (۲) میزان تغییر η, Γ برای هر مؤلفه نشان داده شده است. [۴] و [۵]

جدول ۲- میزان تغییر η, Γ [۴]

Physical Fault	Nondimensional Mass Flow Change (A)	Isentropic Efficiency Change (B)	Ratio A:B
Compressor fouling	Γ_{c1}	η_{c1}	$\sim 1:0.5$
Compressor erosion	Γ_{c1}	η_{c1}	$\sim 1:0.5$
Compressor corrosion	Γ_{c1}	η_{c1}	$\sim 1:0.5$
Turbine fouling	Γ_{t1}	η_{t1}	$\sim 1:0.5$
Turbine erosion	Γ_{t1}	η_{t1}	$\sim 1:0.5$
Turbine corrosion	Γ_{t1}	η_{t1}	$\sim 1:0.5$
Foreign object damage	Γ_{cyl}	η_{cyl}	$\sim 1:2.0$
Thermal distortions	Γ_{cyl}	η_{cyl}	$\sim 1:2.0$
Blade rubbing	$\Gamma_{c1} \& \Gamma_{t1}$	η_{cyl}	$\sim 1:2.0$

در نمودار شکل های (۲) و (۳) نتایج شبیه سازی خرابی توربین گاز نمایش داده شده است. باید توجه کرد که خرابی کمپرسور برای جرم گرفتگی یا سائیدگی یا هر دو مورد می باشد. نقطه (۰،۰) مربوط به نقطه طراحی می باشد. [۴]



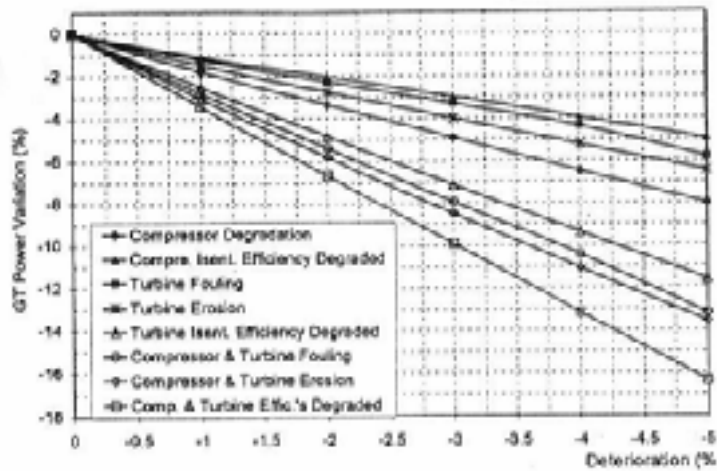
شکل ۲- تغییر راندمان توربین بر اثر کاهش کیفیت [۴]

در بدترین شرایط که راندمان کمپرسور و توربین به صورت همزمان به میزان ۵٪ کاهش یابد، راندمان ۹،۷٪ و توان خروجی ۱۶،۵٪ کاهش می یابد. بنابراین:

$$\eta = \%24.3 - \%9.7 = \%14.6$$

$$\Delta W = \%16.5W = \%16.5 \times 15.47 = 2.6 MW$$

. شکل های (۲) و (۳) نشان می دهند که کاهش راندمان ایزنتروپیک توربین (در مقایسه با کمپرسور) تأثیر بیشتری دارد.

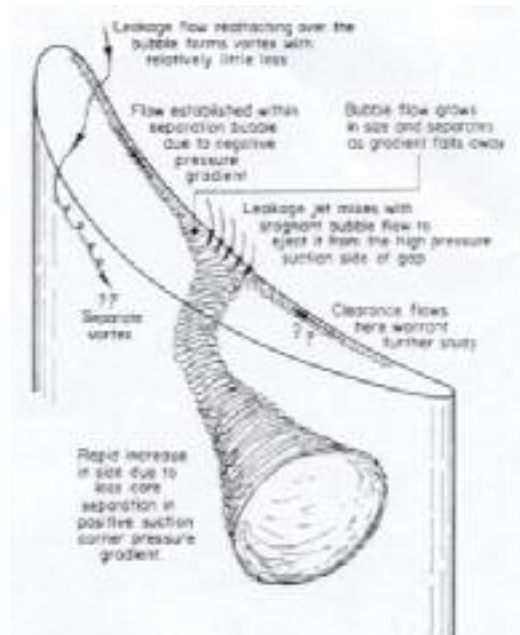


شکل ۳- تغییر توان خروجی توربین بر اثر کاهش کیفیت [۴]

این بدین دلیل است که توربین در هر لحظه دو کار انجام می‌دهد. یکی رانش کمپرسور و دیگری توان خروجی. بنابراین هر افت در راندمان توربین باعث ایجاد دو افت در سیکل می‌شود.

۴- اثرات تغییر لقی

در عمل بر اثر کار کردن کمپرسور و توربین به مرور زمان لقی پره‌ها افزایش می‌یابد. با تغییر لقی جریان در نوک پره آشفتگی می‌شود. نمونه جریان سیال در نوک پره در شکل (۴) نشان داده شده است [۷].



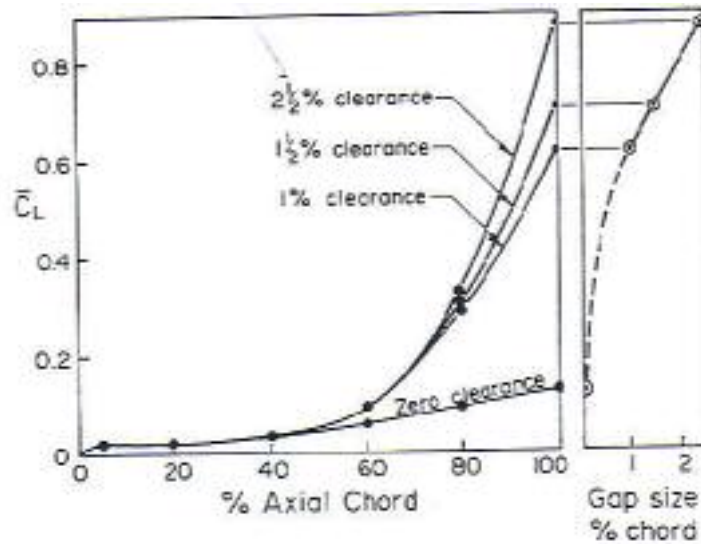
شکل ۴- وضعیت جریان در نوک پره [۷]



rms لقی بصورت زیر تعریف می شود [۲]:

$$rmsTp = \sqrt{\sum (TP)^2} \quad (6)$$

افزایش rms لقی به میزان ۱٪، راندمان کمپرسور را بین ۱-۲ درصد کاهش می دهد. Bindon [۷] تغییر ضریب افت بر اثر تغییر لقی در امتداد وتر پره را محاسبه کرد که نمودار آن در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۵) مشاهده می شود ضریب افت تا ۵۰٪ وتر مقدار ناچیزی است ولی از وسط وتر تا انتهای وتر پره ضریب افت شدیداً افزایش می یابد. در مورد توربین گاز رازی مشاهده شده است که لقی موجود برای بسیاری از پره ها بیشتر از لقی مجاز می باشد. این امر



شکل ۵- رشد ضریب افت در طوط وتر برای لقی های مختلف [۷]

باعث می شود راندمان ایزنتروپیک کمپرسور و توربین بطور قابل ملاحظه ای افت پیدا کرده و حاشیه خط سرج کمتر شود. یا به عبارت دیگر باعث ایجاد زود هنگام سرج شود.

۵- اثر شرایط محیطی

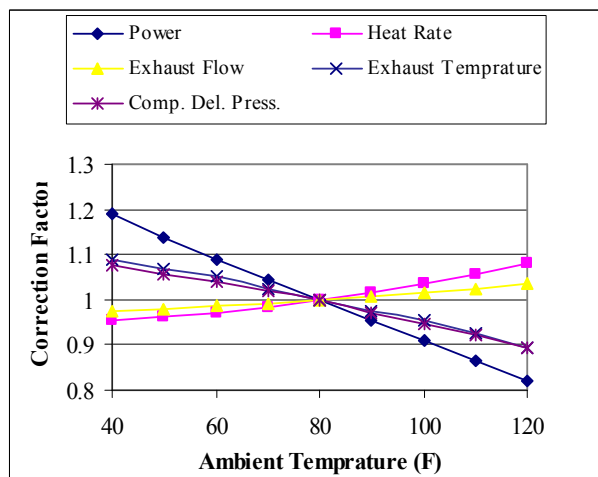
در این قسمت اثرات تغییر شرایط محیطی بر راندمان و توان خروجی نیروگاه توربین گازی مورد بررسی قرار می گیرد.

۵-۱ تأثیر دمای محیط

راندمان و توان خروجی نیروگاه های گازی به شدت تحت تأثیر تغییرات دمای محیط قرار دارند. دو پدیده در توربین گازی، باعث بوجود آمدن چنین تغییراتی می شوند. اول اینکه با افزایش دمای ورودی به کمپرسور نسبت فشار کمپرسور کاهش یافته و در نتیجه راندمان توربین گاز کاهش می یابد. دلیل دوم اینکه، با گرم شدن دمای محیط چگالی هوا پایین آمده و جرم هوای عبوری



از توربین گاز کاهش می‌یابد و به همان نسبت توان خروجی افت پیدا می‌کند. در مورد توربینهای گازی رازی اثر دمای محیط بر پارامترهای مختلف عملکرد دستگاه نسبت به نقطه طراحی ($80^{\circ}F$) در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- ضریب تصحیح پارامترهای توربین گاز رازی بر حسب دمای محیط

در روزهای تابستان دمای هوای منطقه ماهشهر به $43^{\circ}C$ ($110^{\circ}F$) می‌رسد. از شکل (۶) مشاهده می‌شود که توان خروجی در حدود 13.42 MW و در شرایط ایزو ($15^{\circ}C$ یا $59^{\circ}F$) و با همان مصرف سوخت 16.9 MW است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما از $15^{\circ}C$ به $43^{\circ}C$ توان خروجی به میزان 3.5 MW کاهش می‌یابد. برای توربینهای گازی ۲ با عمر سی سال و در حال بهره برداری نیز این قانون صادق است.

۵-۲- تأثیر فشار محیط

تأثیر تغییرات فشار هوا به حدی ناچیز است که با دقت خوبی می‌توان از آن صرف نظر نمود. البته با این فرض که فیلتر هوای ورودی در حالت ایده‌آل بوده و باعث افت دبی هوای ورودی و در نتیجه افت بیش از حد فشار کمپرسور نشود.

۵-۳- تأثیر رطوبت محیط

تغییرات رطوبت هوا، تأثیر شدیدی بر عملکرد توربین گاز ندارد. البته در مواردی که رطوبت به صورت مصنوعی به هوا افزوده می‌شود، مثلاً در خنک کردن هوای ورودی با استفاده از روش مه زنی، باید اثرات آن، مخصوصاً در محفظه احتراق مورد بررسی قرار گیرد.

۶- اثر بهره برداری در بار کم

توربینهای گازی برای نقطه کاری مطلوبی طراحی می‌شوند که به آن نقطه طراحی می‌گویند. در این نقطه راندمان اجزاء توربین گاز (کمپرسور و توربین) و همچنین راندمان سیکل و توان خروجی در محدوده مطلوبی قرار دارند. ولی وقتی توربین گاز با محرکه‌های دیگری کوپل می‌شود و یا نیاز به توان خروجی کاهش می‌یابد، توربین گاز مجبور است در نقاطی خارج از نقطه طراحی کار کند. در این وضعیت راندمان کمپرسور و توربین و همچنین راندمان سیکل به شدت افت می‌کند. لذا مطالعه کارکرد دستگاه در این وضعیت بسیار ضروری است.



برای توربین گاز نو(بدون اثرات کاهش کیفیت)، در نقطه طراحی ($100rpm$, $100\dot{W}\%$) راندمان حرارتی ماکزیمم است. محاسبات نشان می دهد با ثابت ماندن دور و در یک سوم توان خروجی طراحی ($33\dot{W}\%$)، راندمان حرارتی به میزان \square . نقطه طراحی کاهش می یابد [۶]

برای توربین گاز در حال بهره برداری رازی راندمان کمپرسور و توربین و راندمان حرارتی برای دو نقطه کاری با دمای محیط یکسان به صورت زیر محاسبه شده است.

$$\begin{array}{cccc} \dot{W}_n = 7.14MW & \eta_{th} = \%22 & \eta_c = \%81 & \eta_t = \%91 \\ \dot{W}_n = 4.2MW & \eta_{th} = \%18 & \eta_c = \%80 & \eta_t = \%90 \end{array}$$

با مقایسه راندمان های دو حالت مشاهده می شود که با کاهش توان خروجی راندمانها کاهش یافته اند. خصوصاً این کاهش برای راندمان حرارتی ۴٪ می باشد.

۷- روش های افزایش راندمان و توان خروجی از طریق تغییر شرایط محیطی

همانطور که قبلاً مورد بررسی قرار گرفت، با گرم شدن دمای محیط توان خروجی نیروگاه های گازی به شدت افت پیدا می کند. برای به حداقل رساندن این نوسانات ناخواسته، از روش های مختلفی برای سرد کردن هوا استفاده می شود که به شرح زیر می باشند:

الف- خنک کننده تبخیری

ب- خنک کننده مه زن

ج- چیلر تراکمی

د- چیلر جذبی

ه- ذخیره انرژی حرارتی (یخ سازی)

و- سیستم ترکیبی

مزایای روش های الف و ب هزینه اولیه کم، نصب آسان، تعمیر و نگهداری ساده می باشد و معایب آنها یکی محدود شدن میزان سرماسازی به اختلاف دمای حباب خشک و حباب تر محیط می باشد. لذا میزان سرماسازی آنها کم می باشد و دیگری اینکه این نوع خنک کننده ها فقط در مناطق خشک و کم رطوبت کارایی دارند.

روش های ج تا د به سرمایه اولیه زیادی نیاز دارند و هزینه تعمیر و نگهداری آنها بالا است. خصوصاً چیلرهای تراکمی حدود ۳۰ درصد افزایش توان تولیدی را خودشان مصرف می کنند.

پارامترهای مؤثر در انتخاب و طراحی سیستم خنک کننده هوای ورودی:

۱- درجه حرارت و رطوبت محیط

۲- نسبت دبی هوا به توان خروجی (lb/hr/kw)

۳- شیب منحنی عملکرد توربین

۴- تعداد ساعات کاری (هم تعداد ساعات کاری در طول سال وهم تعداد ساعات کاری در زمانهای اوج کاری در روز)

شرایط استاندارد ISO برای درجه حرارت ورودی به توربین $15^{\circ}C$ ($59^{\circ}F$) و رطوبت نسبی ۶۰ درصد و فشار ۱۴.۷ psi می باشد.



نسبت دبی هوا به توان خروجی توربین نیز تأثیر مستقیمی بر افزایش توان دارد. اگر این نسبت (lb/hr/kw) برای سیستم های خنک کننده کمتر از ۳۰ باشد سیستم دارای ارزش اقتصادی خوبی است. و اگر این نسبت بین ۳۰ تا ۳۵ باشد سیستم دارای ارزش اقتصادی متوسط بوده و برای نسبتهای بیشتر از ۳۵ سیستم دارای ارزش اقتصادی ضعیفی است. این نسبت برای توربین گاز رازی در نقطه طراحی برابر است با:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{W}_n} = 57.9 \text{ lb/hr/kw}$$

مشاهده می شود که این نسبت بالاتر از ۳۵ می باشد. بنابراین استفاده از سیستمهای خنک کننده هوای ورودی مقرون به صرفه نیست. البته این عدد برای شرایط کاری معمولی (۵ MW) خیلی بزرگتر بوده و تقریباً ۱۲۸ میباشد. جهت بررسی دقیق تر فرض شده است بتوان با کمک چیلر، هوای ورودی به میزان $10^\circ C (18^\circ F)$ خنک کرد. حال هزینه صرفه جویی در سوخت را با هزینه خرید و نصب یک چیلر مقایسه می کنیم:

در این حالت میزان ظرفیت تبرید ۳۲۰ تن تبرید بوده و میزان صرفه جویی در سوخت مصرفی (گاز طبیعی) حدود ۱۸/۱ گرم بر ثانیه می باشد. قیمت چیلر تراکمی برای تولید این میزان تبرید حدود ۶۵ میلیون تومان است. با این فرضیات زمان بازگشت سرمایه محاسبه شده است. بدون در نظر گرفتن سود سرمایه اولیه ۲۸ سال طول می کشد تا سرمایه اولیه برگردد و با در نظر گرفتن سود سالیانه سرمایه اولیه چیلر، هیچ وقت این سرمایه بر نمی گردد.

۸- نتیجه گیری

جهت بهبود عملکرد توربین گاز در حال بهره برداری سه راه عملی وجود دارد. که به شرح ذیل می باشند:

- ۱-بهبود وضعیت نگهداری و تعمیر
 - ۲-انجام برنامه ریزی مناسب جهت بکارگیری توربین گاز در توانهای خالص خروجی بالا (بالاتر از ۵ مگاوات)
 - ۳-استفاده از سیستمهای خنک کننده هوای ورودی (TIC)
- استفاده از راهکار ۳ به بررسی فنی _ اقتصادی نیاز دارد.

در مورد توربین گاز ۲ رازی، محاسبات نشان می دهد که با در نظر گرفتن سود سالیانه سرمایه اولیه چیلر، هیچ وقت این سرمایه بر نمی گردد. اما بدون در نظر گرفتن سود سرمایه اولیه ۲۸ سال طول می کشد تا این سرمایه برگردد.

۹- مراجع

- ۱-Cohen H., Rogers G., Saravanamuto, H., Gas Turbine Theory, ۱۹۹۶, Longman Scientific & Technical Pub, London,
- ۲-Walsh P., Fletcher P., Gas Turbine Performance, ۱۹۹۸, Oxford: Blackwell Science Ltd.
- ۳-Negri di Montenegro, G., Peretto, "A., Sensitivity Analysis On Brayton Cycle Gas Turbine Performance", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ۱۹۹۷, V119, P 910-916.
- ۴-Zwebek, A., Plidis, P., "Degradation Effects on Combined Cycle Power Plant Performance Part ۱: Gas Turbine Cycle Component Degradation Effects", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ۲۰۰۳, V125, P. 651-657
- ۵-Kurz R., Brun K., "Degradation in Gas Turbine Systems", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ۲۰۰۱, V. 123, P. 70-77



٦-Korakianitis, T., Svensson,K., "Off Design Performance of Various Gas Turbine Cycle and Shaft Configurations", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ١٩٩٩, V.١٢١, P.٦٤٩-٦٥٥

٧-Bindon, J. P., ١٩٨٩, "The Measurement and Formation of Tip Clearance Loss," ASME Journal of Turbomachinery, V. ١١١, pp. ٢٥٧-٢٦٣.