

بررسی اثر بکارگیری روش تزریق بخار به محفظه احتراق (STIG) بر عملکرد توربین‌های گازی Alstom G.T. 10B2

محسن علی مندگاری^۱، مونا زمانی پدram^۲، حسن پهلوانزاده^۳، روح ... وقاری^۴

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی شیمی
Mondegari_ChE@yahoo.com

چکیده

در این مقاله اثر بکارگیری روش تزریق بخار به هوای ورودی به محفظه احتراق (STIG) بر عملکرد توربین‌های Alstom G.T.10B2 که بر روی خطوط اصلی انتقال گاز وجود دارند، بررسی شده است. برای بررسی از اطلاعات طراحی و عملیاتی توربین در محیط شبیه‌سازی Hysys استفاده گردیده است. پارامترهای اقتصادی نیز در نظر گرفته شده تا ارزش انجام طرح از دید اقتصادی نیز بررسی شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در اثر تزریق 6٪ بخار به توربین، 33٪ بر توان تولیدی و 5/3٪ بر راندمان توربین گاز افزوده می‌شود. از دید اقتصادی این کار هنگامی که هدف تولید توان الکتریکی باشد، بیش از 900,000\$/year بر درآمد واحد می‌افزاید. اما در صورت عملکرد توان ثابت، تنها افزایش راندمان و کاهش مصرف سوخت در اثر افزایش راندمان مطرح است. در این شرایط هزینه گاز صرفه‌جویی شده تنها حدود 5000 \$/year-2000 از هزینه آب مورد نیاز بیشتر است در نتیجه استفاده از این روش دستاوردی مثبت برای توربین‌های ایستگاه‌های تقویت فشار گاز که توان الکتریکی تولید نمی‌کنند، به دنبال نخواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: توربین گازی- تزریق بخار - راندمان- توان

1- مقدمه

توربین گازی یکی از تجهیزات مهم در صنایع نفت و گاز است که از آن برای تولید توان و تامین انرژی کمپرسورها، پمپ‌ها، ژنراتورها و ... استفاده می‌شود. در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز نیز برای متراکم کردن گاز خط لوله و مقابله با افت فشار، از توربین گازی استفاده می‌گردد. مسلماً بهبود کارایی توربین‌های گازی سهم قابل توجهی در کاهش انرژی مصرفی صنعت انتقال گاز خواهد داشت.

روش‌های مختلفی جهت بهبود عملکرد توربین‌های گازی وجود دارد که به طور وسیع در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این روش‌ها عبارتند از: خنک سازی هوای ورودی به توربین به کمک روش‌های تبخیری، سردسازی جذبی و یا مکانیکی، استفاده از ریکوپراتور، تزریق آب به هوای ورودی به ریکوپراتور، سیکل‌های ترکیبی با احتراق اضافی و یا بودن احتراق اضافی، تزریق بخار و یا آب به هوای ورودی به محفظه احتراق، بازیابی حرارت دودکش و ... [1و2]

¹ - دانشجوی دکتری مهندسی شیمی

² - دانشجوی دکتری مهندسی شیمی

³ - دانشیار - مهندسی شیمی

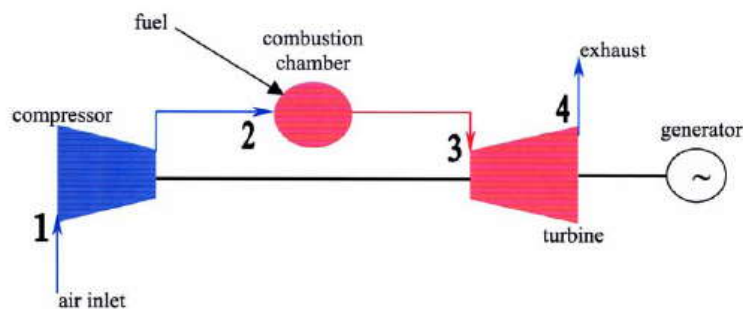
⁴ - دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی راکتورهای هسته‌ای

انتخاب روش مناسب بستگی به پارامترهای مختلفی دارد که کاربری توربین، شرایط محیطی (آب و هوای محیط)، فرآیند و سایر تجهیزات موجود در واحد، شرایط طراحی و عملیاتی توربین گازی و قدمت توربین گاز از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در انتخاب روش موثر جهت بهبود عملکرد توربین گازی هستند.

در ادامه ابتدا در مورد اصول کلی توربین گاز مطالبی بیان می‌گردد سپس روش تزریق بخار به هوای ورودی به محفظه احتراق (STIG) به طور خاص مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از بیان روش بررسی، نتایج و دستاوردهای حاصل بیان می‌شود.

2- توربین گاز

در شکل (1) نمایی ساده از سیکل توربین گاز نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، یک توربین گاز از 3 قسمت اصلی تشکیل شده است. این اجزا عبارتند از کمپرسور هوا، محفظه احتراق و توربین. هوای محیط (نقطه 1) ابتدا وارد کمپرسور می‌شود و توسط کمپرسور فشار آن افزایش می‌یابد (نقطه 2). سپس هوا و سوخت وارد محفظه احتراق می‌گردند و محترق می‌شوند (نقطه 3). گاز احتراقی که دارای دما و فشار بالایی است از توربین عبور کرده و آن را به حرکت در می‌آورد و نیروی دورانی تولیدی توسط توربین به ژنراتور و یا سایر تجهیزات همچون پمپ و کمپرسور منتقل می‌شود. گاز احتراقی بعد از عبور از توربین فشار آن به فشاری نزدیک محیط می‌رسد و وارد اتمسفر می‌شود (نقطه 4) [3، 4، 2].



شکل 1- نمایی ساده از سیکل توربین گاز [1]

با توجه به اینکه شرایط هوای محیط با مکان و زمان متغیر است در نتیجه عملکرد توربین در مکان‌ها و فصول مختلف تغییر می‌کند، لذا انتخاب یک سری شرایط یکسان برای معرفی ویژگی‌های توربین در آن شرایط، امری ضروری به نظر می‌رسد. شرایط انتخاب شده به‌عنوان شرایط هوای استاندارد عبارتند از: دمای 60°F ، رطوبت نسبی 60٪ و فشار 1 bar. در این شرایط راندمان و سایر ویژگی‌های سیکل کاری توربین توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود و برای کار در سایر شرایط از ضرایب تصحیح استفاده می‌گردد [5].

2-1- آنالیز ترمودینامیکی سیکل توربین گاز

راندمان سیکل توربین گازی را می‌توان از طریق آنالیز ترمودینامیکی سیکل بیان کرد. به‌منظور سهولت در کار، یک سیکل برایتون ایده آل در نظر گرفته شده که بر این اساس فرآیندهای 1-2 (تراکم کمپرسور) و فرآیند 3-4 (انبساط توربین) آیزنتروپیک و فرآیند 2-3 (احتراق) و 4-1 (خنک سازی گاز دودکش در حد هوای ورودی) در فشار ثابت رخ می‌دهند. بر این اساس روابط ذیل حاصل می‌شوند [6 و 2].

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{m(h_4 - h_1)}{m(h_3 - h_2)} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (1)$$

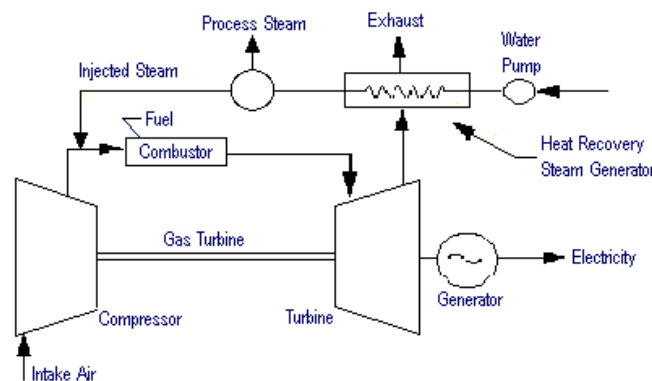
$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{و} \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \text{و} \quad \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{P_r^{\frac{k-1}{k}}}$$

رابطه (2) با فرض‌های ایده‌آل حاصل شده است. در حالت واقعی نه راندمان آیزنتروپیک تجهیزات 100٪ می‌باشند و نه فرآیندهای احتراق و خروجی از دودکش در فشار ثابت رخ می‌دهند. افت فشار و حرارت جریان هوا و گاز که طی عبور گاز از تجهیزات مختلف رخ می‌دهد نیز موجب می‌گردند که راندمان واقعی مجموعه از راندمان ایده‌آل محاسبه شده کمتر باشد. تعیین راندمان عملیاتی توربین‌های گازی براساس اندازه‌گیری یک سری پارامتر و انجام محاسبات در محیط شبیه‌سازی توربین صورت می‌گیرد [7].

3- بررسی اصول روش STIG

در شکل (2) نمایی ساده از سیکل STIG نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده، این روش بر پایه بازیابی مقداری از حرارت دودکش، تولید بخار و تزریق بخار تولیدی به هوای ورودی بر محفظه احتراق استوار است.



شکل 2- نمایی ساده از سیکل STIG

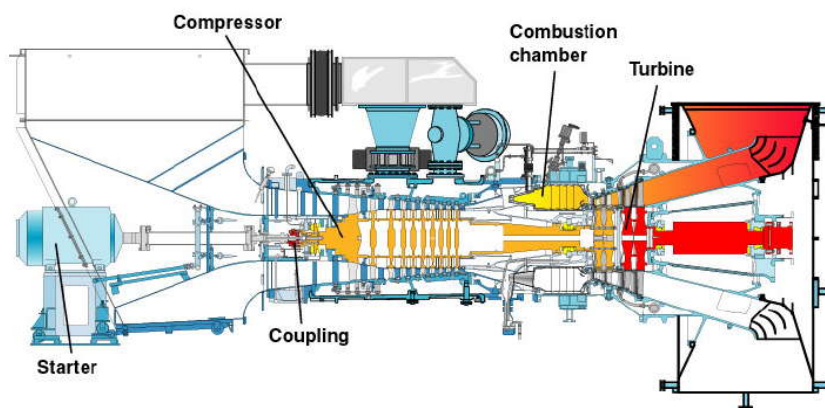
چنانچه میزان بخار تولیدی بیش از نیاز توربین باشد و در واحد زمینه استفاده از آن فراهم می‌تواند در سایر فرآیندها مورد استفاده قرار داد. بکارگیری این روش دارای مزایای است که بدان‌ها پرداخته می‌شود. اول آنکه مقداری از حرارت خروجی از دودکش بازیابی می‌شود که این فرآیند خود به تنهایی موجب بهبود عملکرد و افزایش راندمان توربین می‌شود. البته باید در نظر داشت که بازیابی حرارت نیازمند قرار دادن مبدل‌های بازیابی حرارت (HRSG) است که مقداری افت فشار در مسیر دودکش ایجاد می‌کنند و از اثرات مثبت بازیابی حرارتی مقداری کاسته می‌گردد. از دیگر مزایای روش STIG، تزریق بخار به هوا قبل از محفظه احتراق است. این عمل موجب افزایش دبی جرمی عبوری از توربین و افزایش توان تولیدی، کاهش NOx، کاهش دمای ماکزیمم سیکل (TIT) می‌گردد [2,8,9,10]. البته مقدار دما و فشار بخار تولیدی از پارامترهایی مهم سیکل هستند که تعیین آن‌ها با توجه به سایر پارامترهای عملیاتی توربین صورت می‌گیرد.

4- روش انجام تحقیق

در این تحقیق هدف بررسی اثر روش تزریق بخار به هوای ورودی به محفظه احتراق توربین‌های آلستوم G.T.10B2 است. این توربین، به‌تازگی در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌کارگیری آن در ایران در حال توسعه است [11]. یکی از دلایلی که موجب شد توربین آلستوم G.T.10B2 جهت انجام این تحقیق انتخاب شود، وجود اتصالات و مجاری مورد نیاز برای تزریق بخار است که توسط سازنده در نظر گرفته شده است. این توربین دارای یک محور دوگانه همراه با کمپرسور هوای 10 مرحله‌ای است. محفظه احتراق دارای 18 مشعل است که برای جلوگیری از هدر رفت حرارت با عایق حرارتی خاصی پوشانده شده است. از ویژگی‌های این توربین میزان پایین انتشار NO_x و قابلیت کار با سوخت گاز و مایع است. در جدول (1) مشخصات مهم توربین در حالت ISO و در شکل (3) نیز نمایی از این توربین آورده شده است [12].

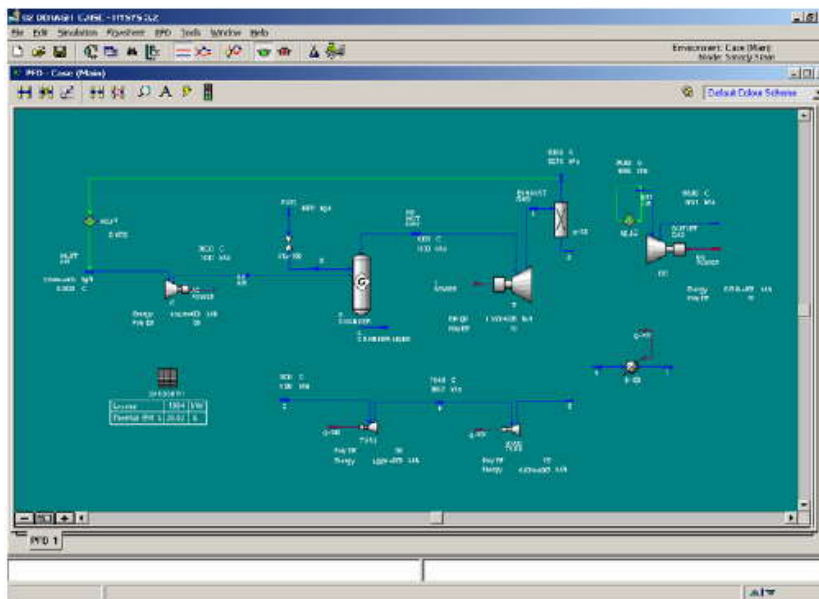
جدول 1- مشخصات مهم توربین گازی آلستوم G.T.10B2 [12]

راندمان	نرخ حرارتی (Heat rate)	سرعت توربین	نست تراکم کمپرسور	دمای اگزوز	دبی اگزوز
%	kJ/kW-h	rpm	-	$^{\circ}\text{C}$	kg/h
35/1	10,285	3850-8085	14	543	80/4



شکل 3- نمایی از توربین گاز Alstom G.T. 10B2 [13]

برای انجام بررسی از نرم افزار Hysys استفاده شده است. ابتدا اجزاء توربین گازی در این نرم افزار شبیه‌سازی شدند که در مورد آن در مرجع [7] توضیحاتی بیان شده و سپس اجزاء و تجهیزات مورد نیاز سیکل STIG نیز در شبیه‌سازی وارد شدند. در شکل (4) نمایی از شبیه‌سازی توربین گازی در محیط Hysys آورده شده است.



شکل 4- نمایی از شبیه‌سازی توربین گاز در محیط Hysys

برای تزریق بخار باید دو پارامتر را تعیین نمود: اول دمای تزریق و دوم درصد تزریق (نسبت جرمی بخار به هوای ورودی به توربین). دمای تزریق بخار خود پارامتر مهمی است که به کمک محاسبات بهینه‌یابی تعیین می‌شود. با توجه به اینکه بخار از بازیابی گرمای دودکش حاصل می‌شود، مسلماً ارتباط تنگاتنگی بین دمای دودکش و دمای بخار تولیدی وجود دارد. اول آنکه بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، نمی‌توان به دمایی بالاتر از دمای دودکش برای بخار تولیدی دست یافت. اما چنانچه هدف دست یافتن به دمایی نزدیک دمای دودکش باشد، باید مبدل بزرگی در دودکش قرار گیرد که این امر هم از دید افزایش هزینه نامطلوب است و هم موجب افزایش افت فشار دودکش و به تبع آن عملکرد ضعیف توربین گاز می‌شود. یافتن دمای مناسب، نیازمند طراحی مبدل‌های مختلف، بررسی هزینه و افت فشار مبدل و میزان حرارت بازیابی شده است. بررسی‌هایی در این خصوص برای توربین مذکور صورت گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در نظر گرفتن دمای 375°C برای بخار تزریقی مطلوب است، چرا که اولاً در حد دمای هوای خروجی از توربین وجود دارد که این امر موجب افزایش نیروی رانش (Driving Force) حرارتی می‌شود و می‌توان با سطح انتقال حرارت کمتر، مقدار قابل توجهی حرارت را بازیابی نمود. بر این اساس مقادیر مختلف تزریق مورد بررسی قرار گرفته است. در انجام شبیه‌سازی و محاسبات چنین در نظر گرفته شده که دمای ماکزیمم سیکل (TIT) ثابت باشد به همین دلیل در صورت تزریق بخار، میزان سوخت مصرفی توربین تغییر می‌کند. البته این فرض با نمودارهای عملکرد توربین در شرایط مختلف، مورد تایید قرار گرفته است.

5- بحث و بررسی نتایج

نتایج حاصل از بررسی مقادیر مختلف تزریق در جدول (2) آورده شده است.

جدول 2- نتایج حاصل از تزریق مقادیر مختلف تزریق بخار به توربین گاز

توان تولیدی kW	راندمان توربین %	سوخت مصرفی kg/h	بار مبدل kW	دمای دودکش °C	مقدار تزریق kg/h	درصد تزریق °C
17640	28/3	4940	0	504	0	0
18622	29/3	5039	2443	478	2826	1
19576	30/2	5136	4886	452	5652	2
20556	31/1	5235	7329	428	8479	3
21510	31/9	5332	9772	404	11305	4
22490	32/8	5431	12215	380	14131	5
23469	33/6	5530	14658	358	16957	6

در جدول (2) مهمترین پارامترهای حاصل از بررسی توربین گاز آورده شده که عبارتند از: درصد و مقدار تزریق، دمای دودکش بعد از بازیابی حرارتی، بار مبدل حرارتی بازیاب، سوخت مصرفی، راندمان و توان تولیدی توربین گاز. شرایط اولیه در حالت بدون تزریق نیز به عنوان مقایسه آورده شده است. از نتایج پیداست که با افزایش میزان تزریق، به دلیل بازیابی حرارت بیشتر، از دمای گازهای احتراقی خروجی از دودکش (بعد از مبدل) کاسته می‌گردد. از طرفی با توجه به اضافه شدن بخار آب به هوای ورودی محفظه احتراق، برای رسیدن به دمای ثابت ماکزیمم سیکل، بر سوخت مصرفی توربین، افزوده می‌گردد. افزایش راندمان عملکرد توربین گاز را می‌توان ناشی از بازیابی مقداری از حرارت دودکش دانست که از دستاوردهای مطلوب بکارگیری این روش است. البته افزایش توان تولیدی توربین نیز از دیگر دستاوردهای عملکرد توربین است که از افزایش دبی جرمی عبوری از توربین ناشی گردیده است.

همانگونه که مشخص است، بکارگیری روش STIG برای توربین‌های گازی Alstom G.T.10B2 دارای دستاوردی مثبت بوده و موجب شده که بیش از 5/8 MW (33٪ نسبت به حالت اولیه) بر توان تولیدی و 5/3٪ بر راندمان عملکرد توربین افزوده می‌شود. اما مسلماً بکارگیری این روش، دارای هزینه‌های ثابت و عملیاتی نیز می‌باشد. در جدول (3) بررسی هزینه عملیاتی توربین گاز صورت گرفته است. در این بررسی، هزینه گاز مصرفی، با در نظر گرفتن قیمت 0/05 \$/SCM برای گاز مصرفی، 1 \$/m³ آب صنعتی در نظر گرفته شده است. برای تعیین ارزش توان تولیدی راندمان ژنراتور 90٪ لحاظ شده و ارزش الکتریسیته 0/03 \$/kWh تعیین شده است. به عبارت دیگر فرض شده که توان تولیدی توربین به کمک ژنراتور به الکتریسیته تبدیل شود. با استفاده از پارامترهای فوق، پارامتر جدیدی به نام نسبت هزینه بر درآمد تعریف شده که از مجموع هزینه بر ارزش توان تولیدی حاصل شده است. با بررسی روند تغییرات این پارامتر، می‌توان دریافت که با افزایش میزان تزریق، نسبت هزینه بر درآمد کاهش می‌یابد به عبارت دیگر می‌توان با هزینه کمتری توان تولید کرد و سوددهی توربین از حالت اولیه بدون تزریق بخار که 1,352,000 \$/year است، با تزریق 6٪ بخار به 2,244,000 \$/year می‌رسد. میزان افزایش سوددهی به مقداری است که هزینه‌های پایه همچون ساخت مبدل بازیابی حرارت و سیستم تولید آب صنعتی را پوشش می‌دهد.

جدول 3- بررسی هزینه عملیاتی توربین گاز در اثر تزریق بخار

نسبت هزینه بر درآمد \$/ \$	ارزش توان تولیدی \$/year	هزینه آب مصرفی \$/year	هزینه گاز مصرفی \$/year	درصد تزریق %
0/676	4,172,000	0	2,820,000	0
0/659	4,404,000	24,800	2,877,000	1
0/644	4,630,000	49,500	2,933,000	2
0/630	4,862,000	74,300	2,989,000	3
0/618	5,088,000	99,000	3,045,000	4
0/606	5,319,000	123,800	3,101,000	5
0/596	5,551,000	148,500	3,158,000	6

بررسی اقتصادی جدول (3)، با این دید صورت گرفت که از توربین گازی آلستوم G.T.10B2 برای تولید انرژی الکتریکی استفاده گردد. اما همان گونه که بیان شد، استفاده از توربین های فوق در بخش انتقال گاز و ایستگاه های تقویت فشار گاز در حال توسعه است که کاربری متفاوت با آنچه در نظر گرفته شده، دارد. هنگامی که از توربین گاز به عنوان محرک کمپرسور استفاده شود، توان اضافی تولیدی در اثر بکارگیری روش STIG بدون استفاده می ماند. چرا که در مرحله طراحی، توربین گاز متناسب با توان مورد نیاز کمپرسور و یا حتی بیشتر از آن انتخاب می شود و توربین توانایی تولید توان مورد نیاز کمپرسور را دارد. در چنین شرایطی، تنها اثر مثبت بکارگیری روش STIG، افزایش راندمان توربین گاز است. با توجه به رابطه (1) در شرایط تولید توان ثابت، افزایش راندمان موجب کاهش گاز سوخت مصرفی توربین گاز می شود. در جدول (4) نتایج بررسی هزینه عملکرد توربین در حالت توان ثابت تولیدی آورده شده است.

جدول 4- بررسی هزینه عملکرد توربین در حالت توان ثابت تولیدی

هزینه آب مصرفی	ارزش سوخت کاهش یافته	کاهش مصرف سوخت	درصد تزریق
\$/year	\$/year	\$/year	°C
24,800	27,800	48/7	1
49,500	53,700	94/1	2
74,300	79,400	139/0	3
99,000	103,400	181/1	4
123,800	127,300	222/9	5
148,500	150,300	263/1	6

از نتایج جدول (4) پیداست که ارزش سوخت صرفه جویی شده، حدود 2000-5000 \$/year از هزینه آب مصرفی بالاتر است و چنانچه سایر هزینه های پایه، همچون هزینه مبدل حرارتی برای تولید بخار، پمپاژ آب، افت فشار مسیر دودکش در نظر گرفته شود، آنگاه بکارگیری این روش برای ایستگاه های تقویت فشار گاز و به طور کلی کاربری هایی با توان ثابت مورد نیاز، دارای دستاوردی مثبت نخواهد بود و به کارگیری آن در توربین های گازی آلستوم توصیه نمی شود. اگرچه انجام این بررسی برای توربین گازی آلستوم G.T.10B2 صورت گرفت، اما می توان انتظار داشت که نتایج حاصل برای سایر توربین های موجود در ایستگاه های تقویت فشار گاز نیز، برقرار باشد.

6- نتیجه گیری

در این مقاله بکارگیری روش STIG برای توربین های گازی آلستوم G.T.10B2 مورد استفاده در ایستگاه های تقویت فشار گاز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهد در صورت تزریق 6٪ بخار، به کارگیری این روش موجب افزایش 33٪ توان و 5/8٪ راندمان توربین می شود که ارزش افزایش توان تولیدی با در نظر گرفتن هزینه آب مصرفی، قریب 900,000 \$/year خواهد بود. این میزان سود آوری، سایر هزینه های عملیاتی و هزینه های پایه مورد نیاز را به خوبی پوشش می دهد. اما چنانچه توان اضافی تولیدی مورد نیاز نباشد (همچون شرایط ایستگاه های تقویت فشار گاز)، آنگاه تنها افزایش راندمان و کاهش مصرف سوخت در محاسبات اقتصادی تاثیر گذار است که در این شرایط هزینه آب مصرفی تقریباً با ارزش گاز صرفه جویی شده برابری می کند و بکارگیری این روش برای ایستگاه های تقویت فشار گاز توصیه نمی گردد.

مراجع

- 1- Poullikkas, A., "An overview of current and future sustainable gas turbine technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9 (2005) 409-443
- 2- Horlock J. H. , *ADVANCED GAS TURBINE CYCLES*, Elsevier, 2003
- 3- Walsh, P.P., Fletcher, P., *Gas Turbine Performance*, Blackwell Science, 2004
- 4- Boyce, M.P., *Gas turbine Engineering Handbook*, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2002
- 5- API Standard 616, "Gas Turbines for the petroleum, chemical, and gas industry services", 1998
- 6- Van Wylen, G.L. and Sontag, R.E.: *Fundamentals of Classic Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 2000
- 7- علی مندگاری م. ، خواجه مبارکه ع. " مقایسه عملکرد توربین های گازی ایستگاه های تقویت فشار خطوط اصلی گاز کشور " مجموعه مقالات اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته، 26-27 تیر 1386، تهران
- 8- Jonsson, M., Yan, J., " Humidified gas turbines—a review of proposed and implemented cycles", *Energy* 30 (2005) 1013–1078
- 9- Fagbenle, R. L., Oguaka, A.B.C, Olakoyejo, O.T., " A thermodynamic analysis of a biogas-fired integrated gasification steam injected gas turbine (BIG/STIG) plant", *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2220–2225
- 10- Nishida, K., Takagi, T., Kinoshita, S., " Regenerative steam-injection gas-turbine systems", *Applied Energy* 81 (2005) 231–246
- 11- آمار تفضیلی شرکت ملی گاز ایران (1383) مدیریت برنامه ریزی]
- 12- <http://www.siemens.com>
- 13- Nordström, L., "Construction of a Simulator for the Siemens Gas Turbine SGT-600," *Linköping* 2005-11-02