

بررسی شستشوی آنلاین کمپرسور جهت افزایش بازده واحد توربین گاز نیروگاهی

زهره زندی-پشتیبانی فنی

شرکت مدیریت تولید برق دماوند

چکیده- در این مقاله به بررسی شستشوی آنلاین کمپرسور پرداخته شده است. رسوبات ایجاد شده روی پره‌ها در طول کارکرد باعث کاهش بازده توربین گاز خواهد شد که نتیجه آن کاهش توان تولیدی واحد نیروگاهی می‌باشد. برای حل این مشکل از شستشوی کمپرسور به صورت آنلاین و آفلاین استفاده می‌شود و با توجه به محدودیت خروج واحدها و عدم شستشوی آفلاین و همچنین طولانی شدن فواصل زمانی شستشوی آفلاین کمپرسور، شستشوی آنلاین این امکان را ایجاد می‌کند تا ضمن جلوگیری از تشکیل رسوبات زیاد بر روی پره‌های کمپرسور، بازده کمپرسور را در زمان کارکرد افزایش داده و در مجموع توان خروجی واحد گازی را بهینه نمود.

واژه‌های کلیدی: شستشوی آنلاین، کمپرسور، توربین گاز، بازده

۱- مقدمه :

کمپرسور از بازده آن کاسته می‌شود. دلیل اصلی این کاهش سایش و رسوب‌گیری سطح پره‌ها می‌باشد و رسوبات دلیل اصلی کاهش دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور می‌باشند. افت توان کمپرسور واحد توربین گازی تاثیر مستقیم بر بازده واحد و توان تولیدی دارد. برای جلوگیری از این مسئله واحد مجهز به سیستم‌های پیچیده فیلتری می‌باشد که تاثیر چشمگیری در کاهش میزان این عوامل آلوده کننده دارند. ولی نمی‌تواند تمام ذرات آلوده کننده را فیلتر نمایند. بسیاری از عوامل آلوده کننده دارای اندازه‌های بسیار کوچکی می‌باشند، که بطور معمول حدود ۸۰ درصد این ذرات زیر ۲ میکرومتر می‌باشند [1]. به هر حال در حین کار، توربین گاز چندین تن از این مواد آلوده کننده را به داخل می‌کشد [1]. بطور مثال به ازای ورود آلودگی در حد ۱ ppm توربین گاز در معرض نوع ۲۵۰۰ کیلوگرم جرم ناخالص با نرخ ۴۵۰ kg/s می‌باشد. نوع مواد و منابع آلوده کننده می‌توانند کاملاً متفاوت باشند. مواد شیمیایی همچون نمک و روغن و مواد طبیعی دیگر آلوده کننده مثل قارچ و حشرات نیز می‌توانند اثرگذار باشند [1]. هوای آلوده نیز ایجاد رسوب می‌کند که این کار بوسیله اضافه شدن ذرات ریز شن با ذرات مایع که گرداگرد پره‌های کمپرسور را در بر می‌گیرند، ایجاد می‌شود. با ورود از مسیر مستقیم و انحراف این ذرات، سطح پره‌ها را مورد سایش قرار می‌دهند [2-4]. رسوب‌گیری کمپرسور به دبی جرمی مواد، کوچکی مواد، جنس مواد، وابسته می‌باشد، وجود بخارات روغن، رطوبت بالا، محیط‌های بیابانی (کویری) نیز می‌تواند پروسه رسوب‌گیری را سرعت ببخشد. یکی از نتایج این رسوب‌گیری، افزایش سطح ناهموار و تاثیر منفی بر روی دبی و تغییر در میزان دبی موثر، می‌باشد. رسوب‌گیری کمپرسور میزان بازده کمپرسور و همچنین ظرفیت دبی کمپرسور را کاهش می‌دهد [4].

رسوبات ایجاد شده روی پره‌ها در طول کارکرد باعث کاهش بازده توربین گاز خواهد شد که نتیجه آن کاهش توان تولیدی واحد نیروگاهی می‌باشد. برای حل این مشکل از شستشوی کمپرسور به صورت آنلاین و آفلاین استفاده می‌شود. در صورت همراه شدن شستشوی آفلاین کمپرسور با شستشوی IGV به صورت دستی، اثر شستشوی آفلاین افزایش می‌یابد. در این مقاله به بررسی شستشوی آنلاین کمپرسور در دو واحد نیروگاهی با برنامه زمانی شستشوی جداگانه و نوع شستشوی متفاوت پرداخته شده است. در نگاه اول، جهت افزایش بازده توربین گاز، شستشوی آفلاین کمپرسور در دوره‌های زمانی بین بازدیدهای واحد و زمانی که واحد سرد شده است پیشنهاد می‌گردد.

شستشوی آنلاین در صورتی که به طور روزانه انجام شود کمترین مقدار کاهش بازده را بر اثر تشکیل رسوب روی پره‌ها دارد. همچنین شستشو با مواد اضافه شده جهت تمیزکاری مورد بررسی قرار گرفته است و با بررسی اعداد در دوره‌های زمانی مشخص شده است که شستشوی آنلاین کمپرسور می‌تواند تا ۱۱ طبقه از کمپرسور را تمیز نماید. به طور خاص برای توربین‌گازهایی که با سرعت بالاتری رسوب می‌گیرند، یک برنامه زمانی روزانه شستشوی آنلاین می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش میزان کم شدن توان توربین گاز داشته باشد. در واحدهای گازی که دارای سیستم فاگ می‌باشند، شستشوی آنلاین هیچگونه مزیت اضافه تری ندارد. جهت تعیین بهترین جدول زمانی شستشوی آنلاین، فرسایش پره‌های توربین نیز باید مد نظر قرار گیرد. یک تعادل میان شستشوی آنلاین و آفلاین می‌تواند باعث بالارفتن راندمان توربین گاز شده و امکان استفاده بهینه از توربین گاز را مهیا سازد.

شرایط کار توربین گاز متناز از شرایط محیطی سایت می‌باشد. (دما و ارتفاع از سطح دریا) با افزایش زمان کارکرد

۲- راندمان کمپرسور

باشد که آب بصورت مایع بوده و بخار نشده باشد و تاثیر این شستشوی محدود به خود IGV و مراحل اولیه کمپرسور می باشد [7-9]. شستشوی آنالین کمپرسور باعث کاهش میزان رسوب گیری کمپرسور می شود، اما نمی تواند بطور کامل این امر را متوقف نماید. از اینرو جهت بازیابی کارایی کمپرسور، پیشنهاد انجام شستشوی آفلاین می باشد که در دوره های مختلف زمانی انجام می گیرد که تاثیر بازیابی کارایی بالاتری را برای کمپرسور دارد.

۲-۳- شستشوی آفلاین کمپرسور

جهت انجام عمل شستشوی آفلاین کمپرسور، واحد باید از مدار خارج و سرد گردد. روند شستشوی در این حالت شامل چندین بخش می باشد. ابتدا کمپرسور توسط آب دمین، خیسانده می شود. در این مرحله از دترجنت نیز می توان استفاده کرد. سپس توربین گازراه اندازی و به ۲۰ تا ۵۰ درصد دور نامی خواهد رسید. سپس دور را کم کرده تا در نهایت متوقف شود. مرحله های نهایی این پروسه با چند بار شستشو با آب می باشد که هر بار تکرار شده و تا زمانی که آب تمیز از ولوهای درین خارج شود و نشانه ای از کثیفی در آب خارج شده نباشد، ادامه پیدا می کند [5,7]. با شستشوی آفلاین کمپرسور رسوب گیری به طور کامل انجام می شود. برای شستشوی آفلاین کمپرسور پیشنهاد می گردد که کار شستشو در زمانی که واحد در باز دید می باشد انجام گیرد تا واحد بخاطر شستشو از مدار خارج نشود و نیاز به سرد کردن واحد نباشد.

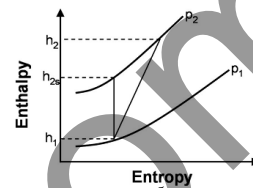


شکل ۲- نمونه نازل به کاررفته در شستشوی آفلاین کمپرسور

۳-۳- تمیزکاری دستی کمپرسور

کار تمیزکاری دستی کمپرسور مستلزم انجام عمل شستشوی پره های IGV همراه با دترجنت و برس می باشد. این نوع شستشو بسیار موثر برای تمیزکاری ذرات چسبیده به سطح پره های توربین می باشد. اما نیازمند خروج و سرد کردن توربین و بسیار وقت گیر می باشد [7]. تمیزکاری دستی کمپرسور تنها بر روی IGV و پره های ردیف اول کمپرسور تاثیر دارد و معمولاً همراه با شستشوی آفلاین انجام می گیرد.

کمپرسور توربین گاز بزرگترین مصرف کننده توربین می باشد که در حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد توان تولیدی توربین را به خود اختصاص می دهد [5]. بنا بر این هر تغییر کوچک در بازده کمپرسور می تواند بر روی بازده توربین گاز تاثیر داشته باشد. بازده یک کمپرسور محوری به صورت نسبت میان افزایش آنتالپی گاز از فشار P1 به P2 بیان شده است (شکل ۱). اگر پروسه واقعی به بخشهای بسیار کوچک ایزنتروپیک تقسیم شود، بازده این کمپرسور به صورت زیر قابل محاسبه می باشد.



شکل ۱- نمودار آنتالپی بر حسب انتروپی

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_{1s}}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

یک کمپرسور محوری مدرن توربین گاز دارای بازده حدود ۸۷ درصد می باشد [5]. با در نظر گرفتن اینکه هوا یک گاز کامل است، اگر آنتالپی به صورت تابعی از دما تعریف شود، اختلاف آنتالپی می تواند به صورت تابعی از دما بیان گردد [6].

$$\Delta h_s = c_p (T_{2,s} - T_1) \quad (2)$$

$$\Delta h_n = c_p (T_2 - T_1)$$

بر اساس یک پروسه ایزنتروپیک [6]:

$$\Delta h_n = c_p T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/c_p} - 1 \right] \quad (3)$$

بازده یک کمپرسور ایزنتروپیک به صورت زیر تعریف شده است که طبق رابطه ۴ بر اساس شرایط دبی ورودی و خروجی کمپرسور، اندازه گیری خواهد شد.

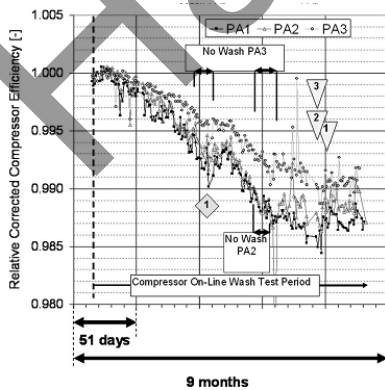
$$\eta_n = \frac{R}{c_p} \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{T_1}{T_2}} \quad (4)$$

۳- تمیزکاری کمپرسور

۱-۳- شستشوی آفلاین کمپرسور

شستشوی آفلاین کمپرسور در حالتی که واحد در بار نامی و IGV کاملاً باز می باشد، انجام می گیرد. جهت شستشوی آفلاین کمپرسور، سیستم شستشو باید در قسمت ورودی هوای توربین گاز نصب شود. به طور کلی آب دمین بوسیله یک تعداد نازل که در قسمت مسیر جریان هوا قبل از پره های مرحله اول تعبیه شده است، تزریق می گردد. نمونه هایی از این نازلها در شکل ۲ نشان داده شده است. علاوه بر آب دمین، از دترجنت نیز جهت تمیزکاری بهتر در شستشوی آفلاین کمپرسور استفاده می شود. تاثیر تمیزکاری آب تا زمانی می

طور نسبی ثابت می ماند بعد از آن مقدار توان خروجی شروع به کم شدن می کند تا به یک مقدار ثابت می رسد. در ابتدا، تجمع رسوب روی پره ها به آرامی صورت می گیرد. با تاثیر افزایش مواد چسبنده به پره ها سرعت کاهش بازده کمپرسور بیشتر می شود ولی بعد از چند هفته یک تعادل جدید شکل می گیرد. با افزایش ناصافی سطح پره ها مقدار بیشتری از مواد آلوده کننده روی سطح پره ها تجمع می کنند. در همان زمان ذرات آلوده کننده بوسیله جریان هوای ورودی به سطح پایین دست برده می شوند [4]. سطح ثابت کاهش راندمان، ممکن از بعد از مدت زمان معینی به آن حد برسد [11]. شستشوی آنلاین مربوط به واحد PA1 بدون تمیزکاری دستی بر روی کمپرسور انجام گرفته است. که این مسئله تاثیر کمی را در بازیابی بازده کمپرسور نشان می دهد. در طی هفته های اول کاهش توان خروجی کمپرسورها دیده نمی شود. این مسئله نیز در مورد توان خروجی واحد ها نیز صادق است. علائم اولیه کاهش میزان بازده کمپرسورها تنها بعد از ۶ هفته برای تمام واحد ها ثبت شده اند (برای PA1 بعد از شش هفته و PA2 بعد از ۹ هفته و برای PA3 بعد از ۱۲ هفته ظاهر شد) سرعت کاهش میزان بازده کمپرسور برای واحدی که شستشو نشده است بیشتر می باشد. برای واحدی که کار شستشو آنلاین به صورت هفتگی در آن انجام گرفته است سرعت کاهش کمتر بوده و برای واحدی که عمل شستشو برای آن به صورت روزانه انجام شده است، سرعت کاهش بازده پایین ترین مقدار را داشته است. شستشوی آنلاین کمپرسور کمک می کند تا بازده کمپرسور برای بازه زمانی طولانی بالا نگه داشته شود. به عبارت دیگر میزان رسوب گذاری کمترین مقدار را در شستشوی آنلاین کمپرسور دارا می باشد (شکل ۵). برای PA3 در زمانی که کار شستشو آنلاین انجام نگرفته است، سرعت کاهش بازده افزایش یافته است. در پایان دوره شستشوی آنلاین کمپرسور، رابطه کاهشی تصحیح شده ثبت شده برای واحد ها به صورت زیر می باشد.



شکل ۴- رابطه بازده بهبود یافته کمپرسور

۱/۴ درصد در PA1، ۱/۲ درصد در PA2، ۱ درصد در PA3 و کاهش توان خروجی، ۲/۸ درصد برای PA1، ۲/۴ درصد برای PA2 و ۲ درصد برای PA3 بوده است. کاهش توان خروجی

تمیزکاری کلی کمپرسور نیز در زمان اورهال واحد قابل انجام می باشد.

۴- بررسی برنامه زمانبندی شستشوی آنلاین کمپرسور

جهت تعیین تاثیرات شستشوی کمپرسور روی بازده کمپرسور و خروجی توان واحد نیروگاهی، لازم است که یک برنامه زمانی جهت بررسی موضوع انجام گیرد. در این بررسی وضعیت واحدها در حالت بار کامل مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و داده های واحد گازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. لازم است که در این وضعیت شرایط دمایی محیط، فشار محیط، رطوبت نسبی، ظرفیت توان ژنراتور، سرعت روتور، خلا کندانسور (در صورتی که واحد سیکل ترکیبی باشد) و... در محاسبات توان خروجی لحاظ گردد. شرایط ورودی کمپرسور را بر اساس شرایط محیطی در نظر گرفته و افت فشار در فیلتر های هوای ورودی، برای شرایط محیطی و سرعت روتور با ضرایب تصحیح در نظر گرفته خواهد شد. که در این مقاله به بررسی وضعیت شستشوی آنلاین در چند توربین گاز در شرایط مختلف پرداخته شده است.

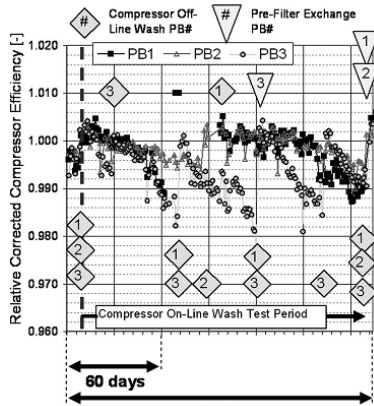
بررسی موضوع روی ۶ واحد توربین گاز که در دو مجموعه Plant A و Plant B واقع شده اند، انجام گرفته شده است. Plant A که در یک منطقه با دمای هوای متعادل قرار گرفته است، شامل سه واحد توربین گاز مدل Alestom GT26 می باشد که به صورت اختصار با PA1 و PA2 و PA3 نشان داده می شوند. Plant B که در یک منطقه با هوای استوایی واقع است از ۳ واحد GT13E2 تشکیل شده است که به ترتیب با PB1, PB2, PB3 نشان داده می شوند.

۴-۱- آنالیز Plant A

در Plant A شستشوی آنلاین کمپرسور در یک دوره زمانی ۷ ماه مورد بررسی قرار گرفته است. در طی این زمان برنامه ای برای شستشوی آنلاین نداشته است. برای PA2 شستشوی هفتگی با آب دمین شده و برای PA3 برنامه شستشوی روزانه بدون هیچگونه برنامه شستشوی درجنت در نظر گرفته شده و آب نیز دمای بالایی نداشته است. شکل ۴ یک مقایسه میان بازده توربین های PA1, PA2, PA3 برای یک دوره زمانی که کار شستشوی آنلاین صورت گرفته است را نشان می دهد. قبل از شستشوی آنلاین برای واحدها شستشوی آنلاین برای تمام واحدها صورت گرفته است. رفتار کاهشی بازده کمپرسورها مشابه یکدیگر بوده و در طی هفته اول تست، هیچگونه علامتی از کاهش بازده کمپرسور وجود نداشته است. در مرحله بعد کاهش میزان بازده با نرخ کمی افزایش می یابد و دوباره در مقدار دیگری ثابت می ماند.

شکل ۵ رفتار کاهشی بازده توربین را برای این سه واحد در طی شستشوی آنلاین نشان می دهد. در ابتدا توان خروجی به

دلیل احتمالی این موضوع آلودگی plant B نسبت به plant A می باشد برای همین سرعت رسوبگیری واحد B بیشتر از واحد A می باشد.

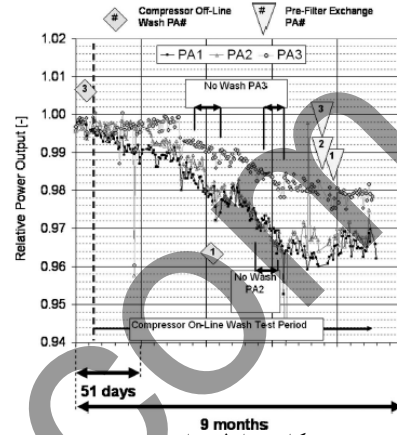


شکل ۶- رابطه بازده کمپرسور برای سه واحد

همانطور که در شکل ۶ دیده می شود، توربین گاز PB2 دارای کمترین مقدار نرخ کاهش بازده کمپرسور است. تاثیر این موضوع، رفتار کاهشی توان خروجی به صورت مسطح می باشد. سرعت کاهشی بازده کمپرسور و توان خروجی واحد PB3 بطور محسوسی بیشتر می باشد. در طی دوره تست، توربین گاز PB3 دارای کاهش توان خروجی در حد ۴ درصد در طی ۶ هفته بوده است. در این زمان PB2 تنها کاهشی در حدود ۱/۵ درصد در طی ۱۱ هفته داشته که در شکل ۷ قابل مشاهده می باشد. مقادیر plant B اجازه می دهد تا بتوان مقایسه ای در مورد شستشوی آنلاین همراه با استفاده از دترجنت، انجام داد. در شکل ۷، ابتدا رفتار خروجی توان PB1 با شستشوی دوبار در هفته با دترجنت، نشان داده شده و در ادامه رفتار خروجی PB2 دیده می شود. زمانی که سرعت کاهش بازده در PB1 بیشتر می شود، مشابه رفتار PB3 که بدون شستشو است می باشد. بنابراین تاثیر قدرت تمیزکاری دترجنت در طی زمان محو می شود و در این زمان شستشو با آب به صورت معمول تاثیر گذارتر است، هر چند در هفته اول دترجنت تاثیر بالاتری از آب، دارد [5].

بر اساس رابطه میان بازده کمپرسور و توان خروجی، کاهش توان خروجی در ابتدا بوسیله کاهش بازده کمپرسور بوجود می آید. بنابراین رسوب گذاری رابه عنوان مهمترین دلیل کاهش توان خروجی plant B می توان به حساب آورد.

ثبت شده برای PA1 ۳/۶ درصد، ۳/۴ درصد برای PA2 و ۲ درصد برای PA3 بوده است. گرچه کاهش توان خروجی کمپرسور نقش مهمی در میزان کاهش توان خروجی واحد دارد ولی تنها عامل تاثیر گذار نمی باشد.

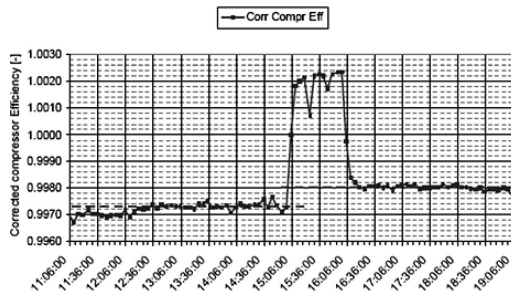


شکل ۵- رابطه توان خروجی

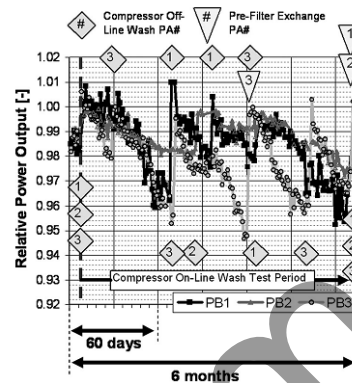
تاثیر بازیابی توان، از طریق تعویض فیلترهای هوای ورودی نیز دارای اهمیت می باشد. پاره نبودن و آسیب دیده نبودن فیلترهای هوا تاثیر زیادی در عدم رسوب گذاری بر روی پره های توربین دارد. بنابراین این کار نسبت رسوب گذاری را کاهش می دهد. بعد از دریافتن این موضوع که شستشوی روزانه کمپرسور، تاثیر گذارترین برنامه شستشو می باشد، طی ۱۳ ماه کار شستشو طبق برنامه روزانه به صورت آنلاین برای سه واحد انجام گرفت و توانهای خروجی مقایسه گردیده است. که در طی این دوره میزان سرعت کاهش توان واحد PA3 کمترین مقدار را داشته و تجمع غبار کمتری نسبت به واحدهای دیگر داشته است.

۴-۲- بررسی Plant B

در این واحد ها نوع متفاوتی از برنامه و شستشوی آنلاین در طی یک دوره زمانی ۶ ماهه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در طی این دوره PB1 یک بار شستشو در هفته، PB2 شستشوی روزانه با آب دمین و هفته ای یک بار نیز شستشو با آب دمین و دترجنت، PB3 بدون شستشوی آنلاین بوده است. در شکل ۶ رابطه تصحیح شده بازده کمپرسور برای سه واحد برای یک بازه زمانی نشان داده شده است. در شکل ۷ رابطه توان تصحیح شده خروجی برای این سه واحد همراه با دوره زمانی مربوط به آن نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، رفتار بازده کمپرسور و توان خروجی برای هر سه واحد مشابه می باشد. در مقابل رفتار مشاهده شده بازده کمپرسور در plant A، در plant B نسبت کاهشی بازده کمپرسور با سرعت بیشتری بدون رابطه ثابت که مستقیماً بعد از شستشوی آنلاین انجام می گیرد، دیده می شود. همچنین مقدار کاهشی همانند plant A به مقداری ثابت نمی رسد.



شکل ۸- بازده تصحیح شده کمپرسور در شستشوی هفتگی



شکل ۷- رابطه توان خروجی برای سه واحد

۶- قابلیت تمیزکاری stage ها در شستشوی آنلاین کمپرسور

شستشوی آنلاین کمپرسور تنها تا مرحله ای تاثیر دارد که آب هنوز به بخار تبدیل نشده است. یکی از اهداف در این قسمت بررسی این مسئله است که تا چه مرحله ای آب قدرت تمیزکنندگی دارد و اثرات این شستشو برای مراحل دیگر تا چه حد می باشد. بررسی بر اساس مقادیر اندازه گیری شده در هوای ثانویه بوده است. فشار و دما در لوله های خروجی خنک کن هوای توربین گاز، که از مراحل ۵، ۱۱، ۱۶ و ۲۲ کمپرسور گرفته شده، اندازه گیری شده است. این اعداد جهت محاسبات بخش بازده نسبت فشار کمپرسور در مراحل ۱ تا ۵ (stage I)، ۶-۱۱ (stage II)، ۱۲-۱۶ (stage III) و ۱۷-۲۲ (stage IV) برای رابطه معادله ۵ مورد استفاده قرار گرفته شده است.

قبل از بررسی بازده کمپرسور و نسبت فشار کمپرسور، تصحیحات محیطی انجام شده است. بررسی تنها بر مبنای کارکرد واحد ها در بارنامی انجام گرفته است. در plant A بررسی روی PA1 انجام گرفته و هدف تعیین کیفی تاثیر رسوب گذاری با یا بدون انجام شستشوی آنلاین کمپرسور بوده است. نتایج نشان می دهد که میزان نسبت فشار در مرحله IV همواره بالا می باشد و شستشوی کمپرسور با هر برنامه زمانی هیچ تاثیری در این قسمت نمی گذارد و تنها به شکل کمپرسور توربین گاز وابسته می باشد. در مرحله III کمپرسور، در صورت انجام نشدن شستشو بازده این بخش و نسبت فشار در این قسمت به صورت خطی می باشد. اگرچه کاهش بازده در این قسمت بدون شستشو مانند کاهش در قسمت های دیگر کمپرسور می باشد، اما در یک برنامه شستشوی روزانه میزان کاهش توان در این مرحله بیشترین مقدار را در بین بخشهای دیگر کمپرسور دارد و علت این است که ذرات آلوده کننده در این قسمت، از بخشهای دیگر که عمل شستشو روی آنها انجام شده است به این مرحله آورده شده اند. عمل رسوب گذاری برای بخش II با انجام یا عدم انجام شستشوی روزانه جمع می شود. بازده این بخش کمپرسور و نسبت فشار در این بخش با انجام عمل شستشوی روزانه کمپرسور افزایش می یابد. افزایش بازده در این مرحله مطابق میزان رسوب گیری در این بخش می باشد. یک تاثیر مشابه برای مرحله I با فشار پایین قابل مشاهده است. بازده

۵- تاثیر شستشوی آنلاین کمپرسور بر روی بازده کمپرسور و توان خروجی توربین گاز

در این قسمت مقدار میانگین ۲ ساعت قبل از شستشو با دوساعت بعد از شستشوی کمپرسور مورد بررسی قرار گرفته است. دیتاها در طی زمانی که بار واحد تغییر نکرده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نسبت بازده تصحیح شده کمپرسور در PA2 در طی قبل و بعد از شستشوی آنلاین که به صورت هفتگی و معمول انجام گرفته شده، در شکل ۸ نشان داده شده است. شستشوی آنلاین کمپرسور، ساعت ۱۵:۰۶ آغاز و در ساعت ۱۶:۰۶ تمام شده است. قبل از شستشوی کمپرسور، رابطه تصحیح شده بازده کمپرسور به طور متوسط حدود ۰/۹۹۷۳ و بعد از شستشو مقدار متوسط بازده ۰/۹۹۸۵ می باشد. بنابراین حدود ۰/۰۷ درصد میزان تولید افزایش یافته است. که توان خروجی واحد PA2 این مقدار را نشان می دهد. قبل از انجام شستشو، میزان توان خروجی تصحیح شده، ۰/۹۹۴۵ و بعد از شستشو توان خروجی تا ۰/۹۹۹۶ افزایش یافته است. نتیجه این شستشو افزایش توان خروجی به میزان ۰/۱۵ درصد می باشد. در طی ۶۰ دقیقه پروسه شستشو افزایش توان به میزان ۰/۹۹۹۵ ثبت شده است. که در واقع این نتیجه تزریق آب به کمپرسور، جهت شستشو می باشد که مشابه سیستم فاگ عمل می کند. بررسی عددی روزانه و هفتگی شستشوی کمپرسور نشان می دهد که میزان بازیابی بازده کمپرسور به صورت هفتگی در حدود ۰/۱۱۲ و برای شستشوی روزانه حدود ۰/۰۳۱ درصد می باشد. که میزان بازیابی متوسط توان در حدود ۰/۰۶۵ و برای هفتگی در حدود ۰/۲۱ درصد می باشد. همانطور که مورد انتظار بوده است، شستشوی هفتگی تاثیر بیشتری در بازیابی توان خروجی کمپرسور دارد. اما بعد از یک هفته عمل رسوبگیری پیشرفت بیشتری نسبت به یک روز دارد و مقدار رسوبات بیشتری جمع می گردد. اگر تاثیر شستشوی کمپرسور با فاصله زمانی آن مقایسه گردد، واضح است که تاثیر شستشوی روزانه کمپرسور به صورت آنلاین دو برابر بیشتر از عمل شستشو به صورت هفتگی می باشد.

Compressor	Sec I	Sec II	Sec III	Sec IV
Section pressure ratio	<	>	↓	↓
Section efficiency	<	>	↓	↓

جدول ۳- تغییرات نسبت فشار مراحل و بازده بخش‌های کمپرسور در یک رژیم شستشوی روزانه

۷- نتیجه گیری و پیشنهاد

شستشوی آنلاین کمپرسور می تواند نرخ کاهش بازده کمپرسور را کاهش دهد. شستشوی آنلاین کمپرسور به هیچ عنوان نمی تواند جایگزین شستشوی آفلاین باشد اما زمان میان دو شستشوی آفلاین را طولانی تر می نماید. این در صورتی است که میزان کاهش توان در مقدار ثابتی باقی بماند. در صورتی که میزان کاهش بازده زیاد نباشد، شستشوی آنلاین باعث بالا رفتن میزان راندمان سیستم می شود. بازیابی توان خالص یک کمپرسور در شستشوی آنلاین که در یک جدول زمانی روزانه انجام شود، در حدود ۴ برابر زمانی می باشد که شستشوی صورت هفتگی انجام گیرد. اما بررسی های بیشتر نشان می دهد که میزان شستشوی روزانه تا ۲ برابر شستشوی هفتگی می تواند تاثیر گذار باشد. در یک دوره زمانی مشخص، شستشوی هفتگی با دترجنت می تواند از شستشوی با آب تنها و به صورت روزانه موثرتر باشد. شستشوی متناوب با دترجنت، می تواند نتایج بهتری نسبت به آب تنها را داشته باشد. بیشترین کاهش بازده کمپرسور در طی دوره ای است که شستشوی آنلاین انجام می گیرد. بیشترین میزان کاهش بازده در کمپرسور در طی شستشوی روزانه، در طبقات انتهایی و به طور خاص از قسمت ۱۱ تا ۱۶ دیده می شود که توزیع بار به مراحل اولیه کمپرسور انتقال پیدا می کند. کاهش در حالتی که عمل شستشوی آنلاین صورت نمی گیرد، به صورت یکنواخت در سراسر کمپرسور پخش می شود. در مراحل اول با یادون شستشوی تطبیق این مسئله دیده می شود. تاثیرات تمیزکاری شستشوی آنلاین کمپرسور تا قسمت های میانی کمپرسور قابل مشاهده می باشد. در شستشوی آفلاین کمپرسور این تمیزکاری به مراحل انتهایی کمپرسور نیز می رسد هر چند تاثیرات تمیزکاری مرحله پایانی کمپرسور قابل اثبات نیست. برای نگهداری بازده توربین گاز در بالاترین مرحله، پیشنهاد می شود که شستشوی آفلاین کمپرسور به صورت منظم انجام شود. از جهت بازده، کار شستشوی آفلاین کمپرسور باید در زمانی انجام گیرد که واحد در حد ۲ درصد افت توان داشته باشد. در صورت بالابودن میزان رسوب گیری یک برنامه منظم شستشوی آفلاین کمپرسور می تواند میزان سرعت کاهش بازده کمپرسور را در بین دو بازدید واحد کم نماید.

شستشوی آنلاین کمپرسور هیچ مزیت خاصی در زمانی که واحد از سیستم فاگ استفاده می کند ندارد. میزان رطوبت بالا در مسیر جریان هوای ورودی به کمپرسور که به صورت قطرات بسیار ریز آب تبدیل شده اند، کار تمیزکاری پره های

مرحله I کمپرسور و نسبت فشار در این مرحله به دلیل تاثیرات رسوب گذاری افزایش می یابد و نسبت فشار در این مرحله در شستشوی روزانه بالاتر می باشد.

دردوره ای که عمل شستشو انجام نمی گیرد، میزان کاهش در تمامی کمپرسور در مقایسه با حالتی که عمل شستشو انجام می گیرد، به صورت یک شکل توزیع شده است. در جدول ۲ روند کاهش نسبت فشار بخش‌های کمپرسور در تمامی زمانها با پیکان نشان داده شده است. در مرحله دوم، متوسط بازده مرحله و متوسط مقادیر فشار PAI در طی دوره شستشوی آنلاین مورد بررسی قرار گرفته و با تغییرات نهایی بازده و نسبت فشار کمپرسور در طی همان دوره زمانی مورد مقایسه قرار گرفته است. برای بخش IV کمپرسور که فشار بالا می باشد، مقدار بازده و نسبت فشار در این قسمت بیشترین مقدار را دارد. در مرحله III نسبت کاهش در نسبت فشار کمپرسور بیشتر از بخش VI می باشد. رابطه کاهش در قسمت بازده این بخش بالا می رود. این بخش دارای بیشترین مقدار رسوب گذاری نسبت به سایر بخش‌های کمپرسور می باشد. به دلیل رسوب گذاری، بارگیری بخش‌های مختلف کمپرسور تغییر می کند. میزان نسبت فشار بخش II کمپرسور افزایش می یابد که این افزایش به صورت نرمال باعث کاهش جریان جرمی می شود. در بخش I یک کاهش بازده قابل مشاهده می باشد. بنابراین بار بخش I افزایش و رسوب گذاری طبقه های جلویی را جبران می کند. بخشی از کاهش در این بخش به دلیل ناصاف بودن پره ها که در نتیجه کار شستشوی آنلاین ایجاد شده، می باشد. بررسی ها نشان می دهد که به دلیل رسوب گذاری، تمایل برای کاهش بارگیری برای مراحل پایانی و افزایش در مرحله های اولیه دیده می شود. تاثیرات تمیزکاری شستشوی آنلاین تا مرحله ۱۱ کمپرسور دیده می شود. بعد از مرحله ۱۱ آب پاشیده شده به شکل بخار در می آید که تاثیر تمیز کاری ندارد. جهت تمیزکاری مراحل پایانی کمپرسور باید شستشوی آفلاین انجام گیرد. در جدول ۳ تغییرات نسبت فشار مراحل و بازده بخش‌های کمپرسور در یک رژیم شستشوی روزانه را نشان داده شده است. نسبت فشار بخشها و بازده در پره های انتهایی بالاتر از بخش‌های اولیه می باشد. یک آنالیز مشابه برای رژیم شستشوی هفتگی بیانگر این واقعیت است که شستشوی روزانه دارای تاثیر بالاتری می باشد.

	Compressor section pressure ratio			
	Sec I	Sec II	Sec III	Sec IV
No compressor washing	>	>	>	=
Daily compressor washing	>	>	>	=

جدول ۲- تغییرات نسبت فشار مراحل بخش‌های کمپرسور قبل و بعد از شستشوی روزانه

the Operation of a Gas Turbine,” ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 129, pp. 114–129.

[6] Saravanamuttoo, H. I. H, Rogers, G. F. C, and Cohen, H., 2001, Gas Turbine Theory, 5th ed, Pearson Education Ltd, Harlow, England.

[7] Demircioglu, S., 2008, “Detail Analysis of Compressor On-Line Wash Impact in the Gas Turbine Performance,” Master thesis, FH Offenburg, Germany.

[8] Bromley, A. F, and Meher-Homji, C. B, 2004, “Gain a Competitive Edge With a Better Understanding of GT Compressor Fouling, Washing,” Comb. Cycl. J. CCJ, PSI Media; Fourth Quarter, pp. 37–41.

[9] Stalder, J. P, and van Oosten, P, 1994, “Compressor Washing Maintains Plant Performance and Reduces Cost of Energy Production,” ASME Paper No. 94- GT-436.

[10] Oosting, J, Stalder, J, Boonstra, K, Eicher, U, de Haan, A, and van der Vecht, D, 2007, “On Line Compressor Washing on Large Frame 9-FA Gas Turbines Erosion on R0 Compressor Blade Leading Edge Field Performance With a Novel on Line Wash System,” Paper No. GT2007-28227.

[11] Stalder, J. P., 2001, “Gas Turbine Compressor Washing State of the Art: Field Experiences,” ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 123, pp. 363–370.

توربین را انجام می دهد [10]. همانطور که در واحدهای مختلف قابل مشاهده است، شستشوی آنلاین کمپرسور ممکن است باعث افزایش میزان ساییدگی سطح پره های توربین به خصوص پره های ردیف اول، شود. این ساییدگی وابسته به سطح پره ها، جنس پره ها و شکل نازلهایی که برای شستشو انجام می شود، می باشد [10]. نازلهای جدیدی برای شستشوی آنلاین کمپرسور هستند که تاثیر کمتری در ساییدگی پره ها دارند و تحت تست می باشند. در صورت حل شدن مشکل ساییدگی پره ها، از نظر میزان بهینه سازی هزینه، این کار قابل بررسی می باشد. در پایان ذکر این موضوع لازم می باشد که با توجه به گستردگی واحدهای توربین گاز در کشور و بررسی شرایط مختلف محیطی استفاده از نازلهای مناسب جهت انجام شستشوی آنلاین می تواند در افزایش بازده این واحدها مفید باشد.

مراجع

[1] Hamed, A, Tabakoff, W, and Wenglarz, R, 2006, “Erosion and Deposition in Turbomachinery,” J. Propul. Power, 222, pp. 350–360.

[2] Diakunchak, I. S, 1992, “Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines,” ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 114, pp. 161–168.

[3] Meher-Homji, C. B., and Bromley, A, 2004, “Gas Turbine Axial Compressor Fouling and Washing,” Proceedings of 33rd Turbomachinery Symposium, Texas A&M University, Houston, Texas.

[4] Tarabrin, A. P, Schurovsky, V. A, Bodrov, A. I, and Stalder, JP, 1998, “An Analysis of Axial Compressor Fouling and a Blade Cleaning Method,” ASME J. Turbomach., 120, pp. 256–261.

[5] Boyce, M. P, and Gonzales, F, 2007, “A Study of On-Line and Off-Line Turbine Washing to Optimize