



بررسی اعمال بازتوانی جعبه هوای داغ بر خصوصیات فنی نیروگاه شهید منتظری اصفهان

رمضانعلی نادری^{۱*}، داوود طغرای^۲، سید مصطفی حسینعلی پور^۳

* نویسنده مسئول: naderi6366@smc.iaun.ac.ir

واژه‌های کلیدی

توربین گاز، بازتوانی، جعبه هوای داغ،
آلاینده های زیست محیطی.

چکیده

یکی از مشکلاتی که در حال حاضر در صنعت برق کشور وجود دارد، بازده حرارتی پایین نیروگاه‌های بخار می-باشد که جهت بهبود راندمان و عملکرد بهینه نیروگاه‌های موجود، باید راهکارهایی ارائه شود. یکی از روش‌های مناسب برای افزایش راندمان و ظرفیت تولید در نیروگاه‌های بخار موجود، بازتوانی (Repowering) می‌باشد. در بازتوانی، یک یا چند توربین گاز در کنار واحد بخار موجود نصب شده و از طریق ادغام آنها با واحد بخار، راندمان و توان واحد افزایش پیدا می‌کند. بازتوانی نیروگاه‌های بخار همچنین با هدف کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار آلودگی به طور پیوسته در حال پیشرفت است. با توجه به شرایط نیروگاه بخار شهید محمد منتظری اصفهان، روش‌های مختلفی برای بازتوانی وجود دارد که یکی از آنها که در آن، فرصت استفاده مجدد از بویلر نیروگاه بخار فراهم می‌شود، بازتوانی به روش جعبه‌هوای داغ است. در این روش با نصب توربین گاز در کنار واحد بخار موجود، گازهای خروجی از توربین گاز وارد محفظه احتراق نیروگاه می‌شوند و از انرژی این محصولات استفاده می‌شود. در این مطالعه اثر اضافه شدن محصولات خروجی توربین گاز به بویلر نیروگاه بخار منتظری و همچنین میزان گازهای آلاینده زیست محیطی پس از بازتوانی مورد بررسی قرار گرفته است.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

2- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

3- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

1- مقدمه

انرژی الکتریکی به دلیل سهولت در بهره‌گیری یکی از پرمصرف‌ترین حامل‌های انرژی به‌شمار می‌رود. این انرژی در ایران عمدتاً توسط نیروگاه‌های آبی، بخاری، گازی و سیکل ترکیبی تامین می‌شود. از آنجایی که تولید انرژی الکتریکی و مصرف آن به‌ویژه در بخش صنعت یکی از شاخصه‌های مهم توسعه به‌شمار می‌رود، برای مقابله با رشد روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، همراه با احداث نیروگاه‌های جدید، نیاز به اتخاذ یکسری راهکارها، جهت بهبود بازده حرارتی و عملکرد مطلوب نیروگاه‌های موجود احساس می‌شود.

یکی از مشکلاتی که در حال حاضر در شبکه تولید برق کشور احساس می‌شود مسائل مربوط به سیکل‌های نیروگاهی بخار است. بسیاری از این نیروگاه‌ها به‌پایان عمر مفید خود رسیده و یا در حال رسیدن به آن هستند، بعلاوه تعداد قابل توجهی از نیروگاه‌های بخار با وجود عمر نه چندان زیاد، دارای راندمان قابل قبولی نمی‌باشند. در این میان می‌توان بعنوان راهکاری قابل قبول از تجارب سایر کشورها در موارد مشابه استفاده کرد.

طی دهه‌های گذشته بازتوانی سیکل‌های بخار با هدف افزایش بازدهی، کاهش هت‌ریت و کاهش انتشار آلودگی به‌طور پیوسته در حال توسعه و پیشرفت بوده است. بازتوانی به عنوان یکی از روش‌های مدیریت مصرف انرژی در بخش تولید، اضافه کردن یا جایگزینی تجهیزات یک نیروگاه موجود برای بهبود تولید اقتصادی، افزایش عمر مفید، بهبود عملکرد زیست محیطی، افزایش قابلیت عملیاتی و تعمیر و نگهداری و استفاده بهینه‌تر از واحد تعریف می‌گردد. توجه به بازتوانی نیروگاه‌های بخار در بسیاری از کشورهای جهان نظیر ایتالیا، بلژیک، هلند و آمریکا و بررسی متدولوژی این کشورها در انجام این عملیات می‌تواند روش موثری در بالا بردن توان و راندمان ناوگان بخار و تامین نیاز برق کشور باشد.

روشهای مختلفی برای بازتوانی مطرح شده است که مهمترین آنها بازتوانی به روش سیکل ترکیبی (بازتوانی کامل)، بازتوانی موازی، بازتوانی پیش گرم‌کن آب تغذیه و بازتوانی جعبه‌هوای داغ می‌باشند. بازتوانی کامل به معنای استفاده از توربین گاز و بویلر بازیافت و حذف بویلر موجود است و ساده‌ترین روش بازتوانی به‌شمار می‌رود و عموماً برای واحدهای قدیمی که عمر بویلر آنها رو به آخر است استفاده می‌شود. در این روش علاوه بر توربین گاز، هزینه بویلر بازیافت هم باید پرداخت شود و در بین روش‌های بازتوانی بیشترین هزینه را دارد [1]. این در حالی است که در روش بازتوانی موازی، بویلر موجود باقی می‌ماند و بخار بویلر بازیافت حرارت در چند فشار مختلف (بسته به شرایط کار و ظرفیت توربین بخار موجود) به بخار بویلر اصلی اضافه می‌شود. در بازتوانی پیش گرم‌کن آب تغذیه، انرژی گازهای خروجی از توربین گاز، در یک مبدل حرارتی که بطور موازی با هیت‌های آب تغذیه در مدار قرار گرفته است، جذب و بازیافت می‌شود.

در روش بازتوانی جعبه‌هوای داغ یا روش اصلاح دیگ بخار، از گازهای خروجی از توربین گاز که حاوی درصد بالایی اکسیژن آزاد می‌باشد به‌عنوان هوای احتراق، در محفظه بویلر نیروگاه بخار استفاده می‌شود و در واقع توربین گاز نقش دمنده اجباری و پیش گرم‌کن هوا در نیروگاه بازتوانی شده را برعهده دارد. این روش را می‌توان پیچیده-ترین روش بازتوانی نامید، زیرا دیگ بخار نیروگاه بایستی قابلیت پذیرش گازهای خروجی توربین گاز را داشته باشد، همچنین باید بررسی شود که آیا محصولات خروجی از توربین گاز به تنهایی جوابگوی واکنش احتراق کامل در بویلر نیروگاه بخار خواهند بود یا جهت احتراق مناسب، نیاز به هوای تازه اضافی هم خواهد بود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در روش جعبه‌هوای داغ، با استفاده از توربین‌های گاز طراحی شده برای ماکزیمم کار مخصوص خروجی، بیشترین بهبود در راندمان حاصل خواهد شد [2]. محصولات خروجی از توربین گاز که با توجه به نوع توربین گازی که مورد استفاده قرار می‌گیرد،

به یک نیروگاه بازتوانی شده موفق تبدیل شد. در این پروژه میزان آلایندة ناکس با حدود 37 درصد کاهش از 63 متر مکعب در ساعت به 40 متر مکعب در ساعت رسید. هزینه کلی برای بازتوانی این واحد 24800 میلیون ریال بود که با بکارگیری این روش سالیانه حدود 600 میلیون ریال در هزینه سوخت که توسط واحد 350 مگاواتی مصرف می‌شد، صرفه جویی به عمل آمد [5].

در سال 2010 آقای زکی و دورماز در یک تحقیق به بررسی تاثیر بازتوانی نیروگاهی در ترکیه به روش جعبه هوای داغ پرداختند. آنها از توربین گازهایی با ظرفیت 10 الی 22 درصد توان سیکل بخار، استفاده کردند. نتایج این شبیه سازی که با نرم افزار ترموفلکس انجام شد، افزایش تقریبی 11 تا 27 درصدی توان تولیدی و کاهش همزمان 7 درصدی تولید دی اکسید کربن را به همراه داشت [6].

2- معرفی نیروگاه بخار شهید محمد منتظری

نیروگاه شهید محمد منتظری دارای 8 واحد بخار 200 مگاواتی مشابه می‌باشد که 4 واحد فاز اول آن بین سالهای 1363 تا 1367 و واحدهای فاز جدید در سالهای 1377 و 1388 به بهره برداری رسیدند.

واحدهای فاز قدیم به علت مستهلک بودن کارآئی لازم را ندارند و واحدهای فاز جدید به علت راندمان پایین نیاز به اعمال روشهایی جهت افزایش بازده حرارتی، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلایندةهای محیط زیست و... می‌باشد.

نیروگاه بخار شهید محمد منتظری نیز همانند سایر نیروگاههای بخار، از قسمت‌های مختلفی چون بویلر، توربین، کندانسور و... تشکیل شده‌است که با توجه به هدف این تحقیق، بخش بویلر از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد.

طراحی بویلر نیروگاه با ظرفیت تولید 670 تن بر ساعت بخار سوپر هیت با دمای 545 درجه سانتیگراد و فشار 140 اتمسفر جهت ورود به توربین فشار قوی و همچنین توان تولید 590 تن بر ساعت بخار ثانویه با فشار 25.4 و دمای 545 درجه سانتیگراد جهت ورود به توربین فشار متوسط

دارای 12 الی 14 درصد مولی اکسیژن هستند با دمایی حدود 500 تا 600 درجه سانتیگراد، وارد کوره می‌شوند و چون دارای انرژی هستند باعث کاهش مصرف سوخت و هوای مورد نیاز جهت احتراق می‌شوند.

اگرچه تحقیقات زیادی پیرامون روش‌های مختلف بازتوانی انجام شده‌است ولی تحقیقات انگشت شماری در سراسر جهان وجود دارد که در آنها در مورد بازتوانی جعبه-هوای داغ بحث شده باشد. در زیر به چند نمونه از آنها اشاره شده است.

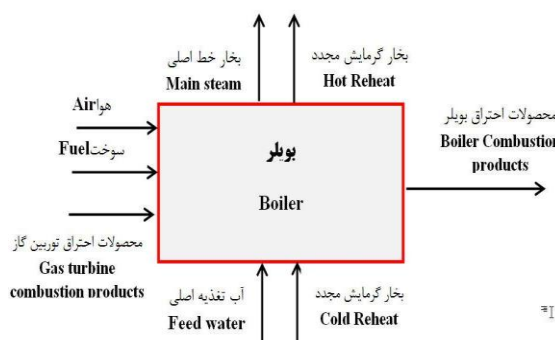
در سال 1982 اولین واحد بازتوانی شده به روش جعبه-هوای داغ به نام هارکولو 60، در کشور هلند راه اندازی شد. اضافه شدن یک توربین گاز با ظرفیت حدود 85 مگاوات به نیروگاه 350 مگاواتی در زمانی که قیمت سوخت به شدت رو به افزایش بود، باعث شد که 10 طرح دیگر برای این روش مد نظر قرار بگیرند. در مجموع واحدهایی با ظرفیت 3800 مگاوات تبدیل به واحدهای بازتوانی شده به این روش گردید [3].

در سال 1994 ملی و همکارانش با جمع‌آوری اطلاعات و آمار مربوط به شبکه تولید انرژی الکتریکی موجود در ایتالیا، اقدام به ارائه راهکارهای مناسب از جمله استفاده از دو توربین گاز برای تبدیل نیروگاههای بخار (به روش جعبه هوای داغ) با توان کمتر از 180 مگاوات به نیروگاه ترکیبی، کرده اند [4].

در سال 1994 شرکت برق توکیو برای اولین بار در ژاپن، جهت بازتوانی واحد شماره 6 نیروگاه Goi از روش جعبه هوای داغ استفاده کرد. ظرفیت نیروگاه به وسیله افزودن یک توربین گاز 126 مگاواتی با 36 درصد افزایش به 476 مگاوات رسید. با این روش راندمان نیروگاه از 37/5 به 41/5 درصد افزایش یافت در حالی که مصرف سوخت فقط 28 درصد اضافه گردید. واحد شماره 6 در ایستگاه Goi مربوط به TEPCO، یک واحد 350 مگاواتی می‌باشد که اولین بار در سال 1958 آغاز به کار نمود و متعاقب آن به یک نیروگاه دوگانه سوز با سوخت LNG تبدیل گردید. سپس با افزودن یک توربین گاز با دمای 1100 درجه سانتیگراد و ظرفیت 125 مگاوات، این واحد

3- اعمال بازتوانی در نیروگاه بخار شهید محمد منتظری

راندمان واحدهای فاز جدید نیروگاه بخار شهید محمد منتظری با طول عمر متوسط 17 سال، در حدود 35 درصد می باشد. در این تحقیق جهت افزایش راندمان واحدهای فاز جدید، اعمال روش جعبه هوای داغ جهت بازتوانی به این صورت که گازهای خروجی مستقیماً وارد بویلر شود، بررسی می شود. بازتوانی به روش جعبه هوای داغ پیچیده-ترین روش بازتوانی می باشد چون انجام تغییرات در قسمت-های مختلف بویلر نیازمند حل محاسبات سخت زیادی می-باشد لذا در این تحقیق سعی می شود بویلر نیروگاه شهید محمد منتظری دستخوش کمترین تغییرات شود. در مدل سازی های انجام شده بویلر به صورت جعبه ای در نظر گرفته می شود که از یک طرف سوخت و هوا و همچنین محصولات خروجی از توربین گاز، وارد آن شده و محترق شوند و از سوی دیگر همان مقدار آب تغذیه که قبل از بازتوانی مورد استفاده قرار می گرفت با همان فشار و دما وارد کوره شود و به صورت بخار از سمت دیگر خارج شود. شکل (1) نمای ساده اضافه شدن محصولات خروجی توربین گاز به بویلر موجود را نشان می دهد.



شکل (1) نمای ساده از اضافه شدن محصولات خروجی توربین گاز به بویلر موجود

چون نباید تغییراتی در ظرفیت بخار خروجی و همچنین محصولات احتراق خروجی داشته باشیم، متناسب با اضافه شدن محصولات خروجی از توربین گاز از دبی هوا و سوخت ورودی به بویلر نیروگاه بخار کاسته می شود. از آنجایی که پس از بازتوانی دبی سوخت کمتری مورد نیاز

می باشد. بویلر از نوع سیرکولاسیون گردش طبیعی می باشد و هوای مورد نیاز بویلر از طریق دو فن دمنده هوا به ظرفیت 515000 مترمکعب در ساعت، پس از پیشگرم شدن در ایرهیت (هنگام استفاده از سوخت مازوت) و همچنین ژونگستروم ها با دمای 245 درجه وارد کوره می شود. و محصولات احتراق توسط دو فن مکنده که ظرفیت هرکدام 765000 متر مکعب در ساعت می باشد به سمت دودکش هدایت می شوند. سوخت مصرفی بویلر گازوئیل (جهت راه اندازی هنگام مازوت سوزبودن)، مازوت و گاز طبیعی می-باشد که در حال حاضر به دلیل جلوگیری از آلودگی هوا، فقط از سوخت گاز استفاده می شود که دبی مورد نیاز جهت هر واحد در حدود 53 مترمکعب در ساعت می باشد.

بخارخروجی از توربین فشار متوسط مستقیماً وارد توربین فشار ضعیف شده و پس از آن وارد کندانسور می-شود و پس از عبور از برجهای خنک کن مجدد وارد سیکل نیروگاه شده و پس از عبور از هیترهای فشار ضعیف وارد دیاراتور شده و توسط فیدپمپ ها با فشاری در حدود 180 اتمسفر وارد هیترهای فشارقوی شده و با دمای 240 درجه سانتیگراد وارد اکونومایزر و پس از آن با دمای حدود 330 درجه وارد درام می شود. بخار جدا شده در درام به سمت سوپرهیترها منتقل شده و آب موجود جهت گرمایش مجدد از طریق دانکامرها وارد واتروالهایی شده که محیط کوره را در برگرفته اند. به دلیل تغییر دانستیه، خروجی واتروالها به سمت درام رفته و عملیات قبل تکرار می شود تا موقعی که همه آب موجود بخار شده و وارد سوپرهیترها شود [7].

جدول (1) مشخصات کلی واحدهای نیروگاه

پارامتر	واحد	مقدار
توان نیروگاه	Mw	200
دبی سوخت مصرفی	M ³ h ⁻¹	54000
دبی هوا	M ³ h ⁻¹	9.6×10 ⁵
ارزش حرارتی پایین سوخت	Kjkg ⁻¹	48855
دمای هوای ورودی بویلر	°C	258
دمای دود خروجی اکونومایزر	°C	330

$$\begin{aligned}
 &(\bar{h}_f CH_4 + \bar{\Delta} h CH_4) + x[(\bar{h}_f CO_2 + \bar{\Delta} h CO_2) \\
 &+ 2(\bar{h}_f H_2O + \bar{\Delta} h H_2O) + 2(AF + 1) \\
 &\times (\bar{h}_f O_2 + \bar{\Delta} h O_2) + 7.52AF(\bar{h}_f N_2 + \bar{\Delta} h N_2)] \\
 &+ a[(\bar{h}_f O_2 + \bar{\Delta} h O_2) + 3.76(\bar{h}_f N_2 + \bar{\Delta} h N_2)] \\
 &\rightarrow b(\bar{h}_f CO_2 + \bar{\Delta} h CO_2) + c(\bar{h}_f CO + \bar{\Delta} h CO) \\
 &+ d(\bar{h}_f H_2O + \bar{\Delta} h H_2O) + e(\bar{h}_f N_2 + \bar{\Delta} h N_2) \\
 &+ f(\bar{h}_f O_2 + \bar{\Delta} h O_2) + g(\bar{h}_f NO + \bar{\Delta} h NO) \quad (8)
 \end{aligned}$$

همچنین رابطه ای با فرض ثابت ماندن دمای گازهای

خروجی از اکونومایزر بویلر نیروگاه بخار، بدست می آید. با اعمال قانون بقای انرژی برای محصولات خروجی از بویلر خواهیم داشت:

$$(\dot{m}_{gt} + \dot{m}_{ab} + \dot{m}_{fb}) \times CP_{eb} \times (T_{AFb} - T_g) = \frac{\dot{Q}_b}{\eta_b \cdot \eta_{ccb}} \quad (9)$$

می توان مقادیر دبی جرمی هوا و سوخت مورد نیاز برای بویلر جدید را برحسب مجهولات a, x به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_{fb} = \frac{M_{CH_4} \times \dot{m}_{gt}}{M_{gt} \times X} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{ab} = \frac{M_{Air} \times a \times \dot{m}_{gt}}{M_{gt} \times X} \quad (11)$$

مقدار پارامتر M_{gt} برابر است با مجموع جرم ملکولی محصولات خروجی از توربین گاز

$$M_{gt} = M_{CO_2} + 2.M_{H_2O} + 2(A - 1)M_{O_2} + 7.52A \times M_{N_2} \quad (12)$$

و جرم ملکولی هوا نیز برابر است با:

$$M_{Air} = M_{O_2} + 3.76M_{N_2} \quad (13)$$

راندمان اتاق احتراق سیکل ترکیبی (η_{ccb}) معمولاً 98 الی 99 درصد در نظر گرفته می شود. جهت بدست آوردن راندمان بویلر از رابطه (14) استفاده می شود که $\dot{m}_1$ دبی آب ورودی به بویلر و $\dot{m}_5$ دبی بخار برگشتی از توربین می باشد، همچنین $h[2], h[1]$ آنتالپی آب ورودی و بخار خروجی از بویلر و $h[6], h[5]$ آنتالپی بخار سرد برگشتی از توربین و بخار ثانویه خروجی از بویلر می باشد.

$$\eta_b = \frac{(\dot{m}_1 \times (h[2] - h[1]) + \dot{m}_5 \times (h[6] - h[5]))}{(\dot{m}_f \times LHV)} \quad (14)$$

است، تعدادی از مشعل های بویلر مورد استفاده قرار نمی گیرند، همچنین به دلیل کاهش دبی هوای مورد نیاز و افزایش دمای هوای ورودی پس از مخلوط شدن با محصولات خروجی از توربین گاز، احتمال حذف یکی از فن های دمنده¹ و همین طور ژونگستروم² ها وجود دارد.

4- فرآیند احتراق در بویلر بازتوانی شده

همانطور که قبلاً گفته شد در بازتوانی به روش جعبه هوای داغ، گازهای خروجی از توربین گاز وارد کوره نیروگاه بخار می شود. برای آنالیز احتراق در بویلر بازتوانی شده فرض می کنیم احتراق در یک حجم کنترل ایزوله صورت می گیرد و محصولات خروجی از توربین گاز همزمان با احتراق گاز طبیعی و هوا وارد بویلر می شود.

معادله احتراق در محفظه احتراق توربین گاز را می توان به فرض سوخت گاز طبیعی خالص متان (CH_4) به صورت زیر بیان کرد:

$$CH_4 + 2AF(O_2 + 3.76N_2) = CO_2 + 2H_2O + 2(AF - 1)O_2 + 7.52AFN_2 \quad (1)$$

بنابراین معادله احتراق تکمیلی در بویلر با اضافه شدن گازهای خروجی توربین گاز و استفاده از هوای اضافی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 CH_4 + X(CO_2 + 2H_2O + 2(AF - 1)O_2 \\
 + 7.52AFN_2) + a(O_2 + 3.76N_2) = bCO_2 \\
 + cCO + dH_2O + eN_2 + fO_2 + gNO \quad (2)
 \end{aligned}$$

جهت بدست آوردن مجهولات معادله (2)، می توان از چهار معادله بالانس جرمی برای عناصر معادله به ترتیب زیر استفاده کرد:

$$1 + X - b - c = 0 \quad (3)$$

$$4 + 4X - 2d = 0 \quad (4)$$

$$2AFX + 2a - 2b - c - d - 2f - g = 0 \quad (5)$$

$$15.04AFX + 7.52a - 2e - g = 0 \quad (6)$$

با توجه به ثابت فرض کردن توان حرارتی جذب شده در بویلر نیروگاه بخار، می توان از رابطه زیر کمک گرفت:

$$\sum_R n. (\bar{h}_f + \bar{\Delta} h) = \sum_P n. (\bar{h}_f + \bar{\Delta} h) \quad (7)$$

با توجه به ثابت فرض کردن توان حرارتی جذب شده در بویلر نیروگاه بخار و معادله احتراق (2) خواهیم داشت:

¹ Forced Draft Fan

² Ljungstrom

$$K_1 = \frac{y_{CO}}{y_{CO2}} \sqrt{y_{O2} + \frac{P}{P_{ref}}} \quad (18)$$

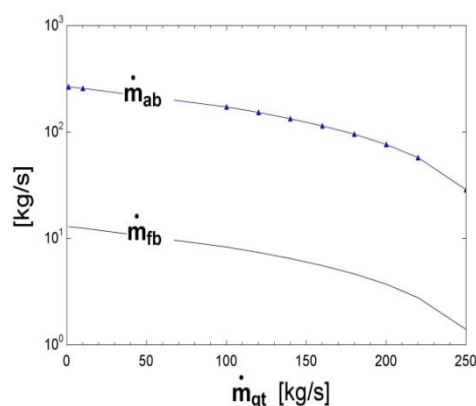
$$\Delta G_2^0 = -R \cdot T \cdot \ln K_2 \quad (19)$$

$$K_2 = \frac{y_{NO}^2}{y_{O2} \cdot y_{N2}} \quad (20)$$

در نهایت مدل سازی انجام شده به یک دستگاه معادلات غیر خطی منجر خواهد شد که با حل این دستگاه معادلات، پارامترهای مورد نظر در مدل سازی محاسبه خواهند شد. برای حل این دستگاه معادلات از نرم افزار EES⁴ استفاده شده است.

5- نتایج و بحث

همانطور که در شکل (2) مشخص است هرچه دبی محصولات خروجی از توربین گاز بیشتر باشد یا به عبارت دیگر توربین گاز با توان بزرگتری انتخاب شود، مقدار سوخت و هوای مورد نیاز بویلر نیروگاه بخار کمتر می شود.



شکل (2) تاثیر افزایش دبی محصولات خروجی توربین گاز بر روی دبی هوا و سوخت مورد نیاز بویلر بازتوانی شده اگرچه انتخاب توربین گاز با توان بیشتر، باعث کاهش مصرف سوخت و هوا در بویلر بازتوانی شده، می شود ولی همانطور که در شکل (3) مشخص است، پایین آمدن دمای آدیاباتیک شعله به ما این اجازه را نمی دهد که توربین های گاز با دبی خروجی زیاد انتخاب کنیم.

برای بدست آوردن مولهای محصولات احتراق و همچنین دمای آدیاباتیک شعله به معادلات دیگری نیازمندیم که در ادامه با معرفی واکنش های تجزیه، از این معادلات کمکی استفاده خواهیم کرد.

برخی از مواد ایجاد شده در طی احتراق در اثر تجزیه مولکولها به مولکولهای کوچکتر یا اتمها بوجود می آیند. این پدیده را انفکاک¹ می نامند. علاوه بر عدم ترکیب تمامی مولکولهای سوخت با هوا در اثر عدم اختلاط کامل، عامل دیگری که موجب عدم ایجاد احتراق کامل سوخت می- باشد، انفکاک است. انفکاک معمولاً در دماهای بسیار زیاد رخ می دهد و مقدار آن در دماهای پایین ناچیز است [8]. در واکنش شیمیایی احتراق گاز طبیعی با اکسیژن هوا فرض شده است که در دمای احتراق، واکنش تجزیه $2NO = N_2 + O_2$, $2CO_2 = 2CO + O_2$ وجود دارد و از بقیه واکنش های تجزیه صرف نظر شده است.

از این دو معادله تجزیه برای تعیین ضرایب مجهول محصولات احتراق استفاده می شود. برای این منظور از تعریف ثابت تعادل² و هم ارزی آن با تابع گیبس³ استفاده می کنیم [9].

تغییرات تابع گیبس استاندارد برای واکنش تعادلی تجزیه CO_2 و NO به صورت زیر تعریف می شود.

$$\Delta G_1^0 = 0.5 \bar{g}_{O2} + \bar{g}_{CO} - \bar{g}_{CO2} \quad (15)$$

$$\Delta G_2^0 = 2 \bar{g}_{NO} - \bar{g}_{O2} + \bar{g}_{N2} \quad (16)$$

ثابت تعادل در واقع برای پیش بینی میزان انفکاک در شرایط معین تعریف می شود و مقدار آن در هر دما مقدار ثابتی است. برای واکنش تجزیه CO_2 و NO ثابت تعادل به صورت روابط زیر تعریف می شود [8].

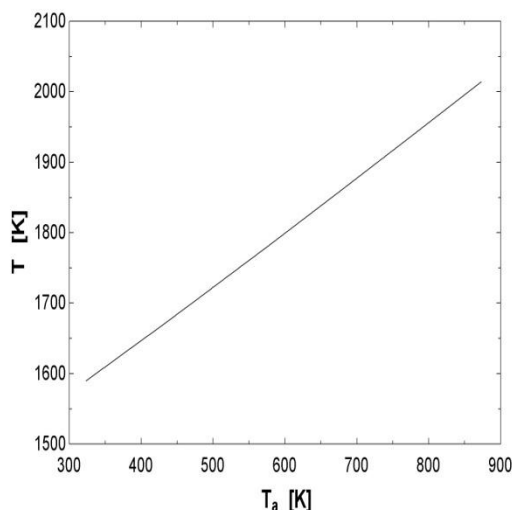
$$\Delta G_1^0 = -R \cdot T \cdot \ln K_1 \quad (17)$$

¹ Dissociation

² Equilibrium constant

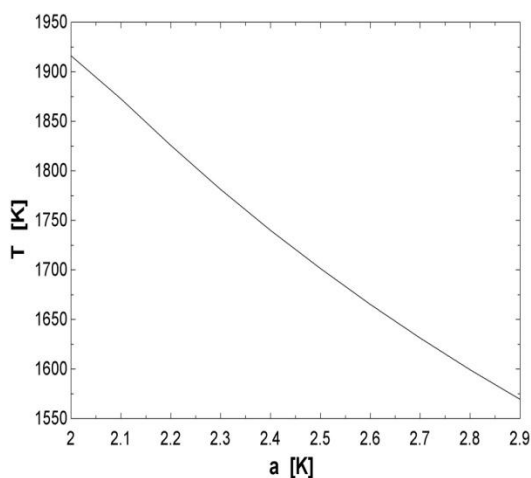
³ Gibbs function

⁴ Engineering Equation Solver



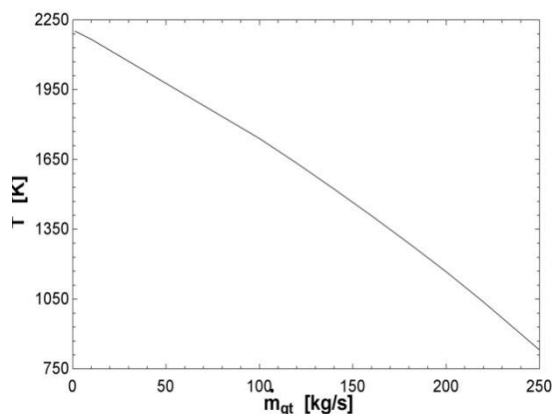
شکل (5) تاثیر افزایش دمای هوای ورودی به بویلر بر دمای آدیاباتیک شعله

اگرچه طبق شکل (6) کاهش درصد هوای اضافه باعث افزایش دمای آدیاباتیک شعله می شود ولی به دلیل افزایش آلاینده های زیست محیطی بر اثر احتراق ناقص، می بایست درصد هوای اضافی بهینه انتخاب شود.



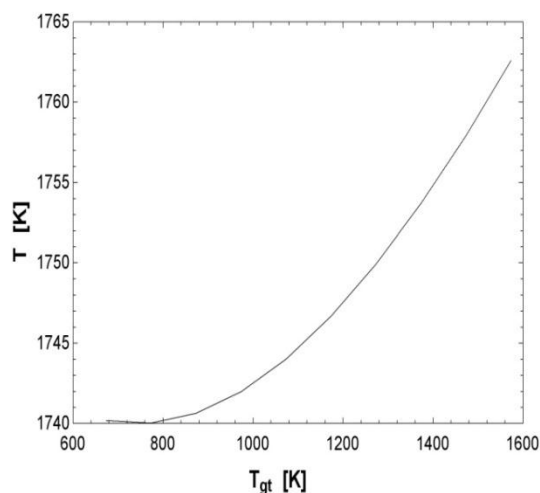
شکل (6) تاثیر کاهش درصد هوای اضافه بر دمای آدیاباتیک شعله

کاهش میزان آلاینده های زیست محیطی با انتخاب درصد هوای اضافه بیشتر را در شکل (7) به خوبی می توان دید.



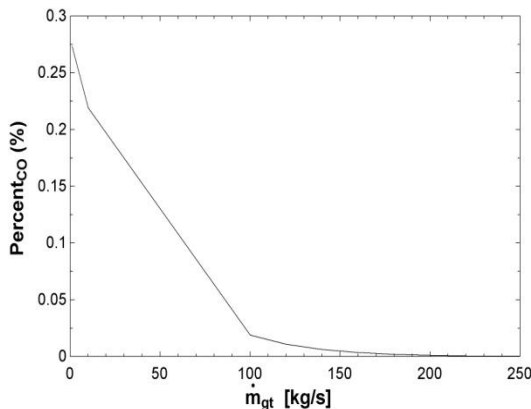
شکل (3) تاثیر افزایش دبی محصولات خروجی توربین گاز بر دمای آدیاباتیک شعله

جهت افزایش دمای آدیاباتیک شعله در محفظه بویلر بازتوانی شده، می توان توربین گاز با دمای محصولات خروجی بالاتر انتخاب کرد و همچنین دمای هوای ورودی به بویلر را افزایش داد و یا مقدار درصد هوای اضافه کمتری جهت احتراق در نظر گرفت. در شکل (4) نشان داده شده است که با انتخاب توربین گاز با دمای خروجی بالاتر، دمای آدیاباتیک شعله بیشتری شود.



شکل (4) تاثیر افزایش دمای محصولات خروجی توربین گاز بر دمای آدیاباتیک شعله

شکل (5) تاثیر بالا بردن دمای هوای ورودی به بویلر توسط پیشگرم کن، بر دمای آدیاباتیک شعله را نشان می دهد. با نگاهی به آن متوجه می شویم که تاثیر افزایش دمای هوای به بویلر بیشتر از انتخاب توربین گاز با دمای خروجی بالاتر است.



شکل (9) تاثیر افزایش دبی محصولات خروجی توربین گاز بر درصد مونواکسید کربن خروجی از بویلر

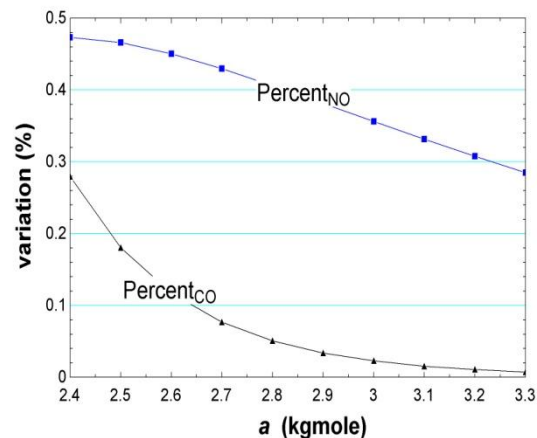
6- نتیجه گیری

از آنجایی که بازتوانی نیروگاه‌های بخار قدیمی نسبت به احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با خصوصیات فنی مشابه، نیازمند سرمایه‌گذاری کمتری می‌باشد، می‌توان به عنوان روشی کارآمد بازتوانی نیروگاه‌های بخار را مورد بررسی قرار داد.

علاوه بر لزوم ارتقاء راندمان، اجرایی شدن قانون هدفمندسازی یارانه‌ها و بالطبع افزایش قیمت سوخت و همین‌طور محدودیت استفاده از سوخت گاز در فصول سرد سال، استفاده از روش جعبه‌هوای داغ را ضروری‌تر می‌کند. در واقع کاهش مصرف سوخت که در این روش محسوس است، با اجرایی شدن قانون هدفمندسازی یارانه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی دیگر از مزایای استفاده از روش جعبه‌هوای داغ در نیروگاه شهید محمد منتظری، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی از جمله ناکس و مونواکسید کربن می‌باشد.

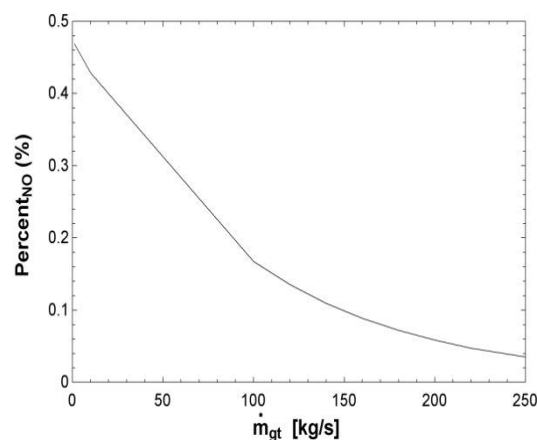
6- فهرست علائم

a	مقدار هوای مورد نیاز احتراق
	هوای اضافه مورد نیاز احتراق در توربین
AF	گاز
CP_{eb}	ظرفیت گرمایی (KJ/Kmol.K)
CH_4	متان



شکل (7) تاثیر افزایش درصد هوای اضافه بر محصولات خروجی از بویلر

همانطور که در شکل (8) مشخص است هرچه دبی محصولات خروجی از توربین گاز بیشتر می‌شود، درصد آلاینده‌های زیست محیطی چون مونواکسید کربن و ناکس در دود خروجی (به دلیل وجود اکسیژن در این محصولات و همچنین کاهش دمای شعله آدیاباتیک)، کمتر می‌شود.



شکل (8) تاثیر افزایش دبی محصولات خروجی توربین گاز بر درصد ناکس خروجی از بویلر

کاهش مقدار مونواکسید کربن با اضافه شدن محصولات خروجی توربین گاز که در شکل (9) نشان داده شده‌است به خاطر وجود اکسیژن در گازهای خروجی توربین گاز می‌باشد.

[2] نیری خضرو و، سید محمودی م، استفاده از هوای تازه در بازتوانی نیروگاه های بخار موجود به روش جعبه هوا، بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق.

[3] Ploumen PJ, Veenema JJ, Dutch Experience with Hot Windbox Repowering, 96-GT-250, ASME, 1996.

[4] Melli, V. Naso, E. Sciubba, Modular Repowering of Power Plants With Nominal Ratings Lower Than 180 MW: A Rational Design Approach and Its Application to the Italian Utility System, *Journal of Energy Resources Technology*, ASME, 1994.

[5] Takao Koike, Yoshiki Noguchi, Repowering of thermal power plants as fully-fired combined cycle generating plants. *A paper presented at the IEA Asia Pacific Conference on Zero Emissions Technologies*, February 16, 2004. Queensland, Australia.

[6] Zeki M, Durmaz A, Hot windbox repowering of coal-fired thermal power plants, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 2013.

[7] آرشیو نیروگاه شهید محمد منتظری اصفهان.

[8] مبینی ک، سوخت و احتراق، انتشارات شرح، چاپ دوم، تهران، 1387.

[9] معرفت م، مدل سازی تحلیلی مکانیزم های مختلف انتقال حرارت بین شعله و ظرف در اجاق گازخانگی، نشریه پژوهشی مکانیک ایران، سال دوازدهم، شماره اول، 1389.

K_1	ثابت تعادل واکنش تجزیه CO_2
K_2	ثابت تعادل واکنش تجزیه NO
M_{Air}	جرم مولکولی هوا
M_{CH4}	جرم مولکولی متان
$\dot{m}_{ab}$	دبی هوای مورد نیاز بویلر بازتوانی شده (Kg/s)
$\dot{m}_{ag}$	دبی هوای توربین گاز (Kg/s)
$\dot{m}_{fb}$	دبی سوخت مورد نیاز بویلر بازتوانی شده (Kg/s)
$\dot{m}_{fg}$	دبی سوخت توربین گاز (Kg/s)
$\dot{m}_{gt}$	دبی دود خروجی از توربین گاز (Kg/s)
T	دماي محصولات احتراق (K)
P	فشار محصولات احتراق (Kpa)
P_{ref}	فشار استاندارد (Kpa)
R	ثابت جهانی گازها
Y_X	کسر مولی گونه X در تعادل
η_b	بازده بویلر
η_{ccb}	راندمان محفظه احتراق سیکل ترکیبی
$\bar{h}_f$	آنتالپی محصولات (Kj/kmol)
$\overline{\Delta h}$	تغییرات آنتالپی
ΔG_1^0	تغییرات تابع گیبس استاندارد برای واکنش تعادلی تجزیه CO_2
ΔG_2^0	تغییرات تابع گیبس استاندارد برای واکنش تعادلی تجزیه NO

مراجع:

[1] حسینعلی پور م، مهرپناهی ع، مبینی ک، بررسی اثر انجام بازتوانی کامل بر ارتقاء خصوصیات فنی-اقتصادی یک نیروگاه بخار، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره 11، شماره 1، 1390، صفحه 1 تا 18.