

انتخاب بویلر بازیاب حرارت بهینه در بازتوانی به روش بویلر کمکی

غلامرضا احمدی، عابدین عرب پور

واحد بهره برداری نیروگاه شهید منتظری

اصفهان، ایران

Ghrahmadi22@gmail.com

۱. مقدمه

ظرفیت نیروگاه‌های ایران در پایان سال ۱۳۹۳ معادل ۷۳۱۵۲ MW بوده است که طبق برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته تا ۱۰ سال آینده باید بین ۴۷ تا ۵۰ هزار مگاوات نیروگاه جدید وارد مدار شود [۱-۲]. در حال حاضر ۲۶/۱٪ از نیروگاه‌های موجود از نوع سیکل بخار، ۳۶/۱٪ سیکل گازی و ۲۵/۳٪ نیز سیکل ترکیبی هستند. سهم نیروگاه‌های دیزلی، بادی و انرژی‌های نو نیز ۰/۸٪ است. در همین سال سهم نیروگاه‌های سوخت فسیلی در تولید برق مورد نیاز کشور معادل ۹۳/۲٪ بود. بر خلاف اینکه نیروگاه‌های برق آبی ۱۴/۷٪ از کل ظرفیت نصب شده را تشکیل می‌دهند، اما به دلیل کاهش بارندگی در سال‌های اخیر، این نیروگاه‌ها تنها ۵/۱٪ از تولید را به خود اختصاص داده‌اند. رشد منفی متوسط بازده نیروگاه‌های حرارتی کشور در سال‌های گذشته [۱]، که نشان دهنده فرسایش روزافزون این نیروگاه‌ها است، سرمایه‌گذاری جهت افزایش بازده آنها را ضروری می‌کند. در حال حاضر متوسط بازده نیروگاه‌های حرارتی کشور حدود ۳۷ درصد است که طبق برنامه‌ریزی‌های وزارت نیرو این بازده در سال ۱۴۲۰ باید به حدود ۴۹ درصد افزایش یابد [۳].

۱.۱. مروری بر کارهای انجام شده.

در این بخش خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده قبلی در خصوص بازتوانی نیروگاه‌های بخار ارائه می‌شود. شاه نظری و همکاران [۴] در یک تحقیق به مطالعه پیرامون بازتوانی نیروگاه‌های بخار پرداختند. آنها انواع روش‌های بازتوانی جزئی را تشریح کرده و به انجام محاسبات برای بازده جدید سیکل نیروگاه لوشان در هر یک از روش‌های بازتوانی پرداختند. آنها

چکیده — یکی از روش‌های بسیار جذاب بازتوانی نیروگاه‌های بخار، روش بویلر کمکی (یا بازتوانی موازی) است. انتخاب تعداد سطوح فشار در بویلر بازیاب حرارت و همچنین روش مناسب جهت ادغام بخار تولیدی در بویلر بازیاب حرارت با سیکل اصلی از اصلی‌ترین مراحل اجرای بازتوانی هستند. در این مقاله به انتخاب بویلر بازیاب حرارت بهینه برای بازتوانی سیکل نیروگاه شهید منتظری اصفهان به روش بویلر کمکی پرداخته شده است. برای این کار ضمن معرفی سه طرح مجزا برای بویلر بازیاب حرارت، به تحلیل چند پارامتر موثر در هر کدام پرداخته می‌شود. در این پارامترها تغییرات جدید در بویلر اصلی، دبی بخار توربین‌ها و اثرات منفی اجرای طرح در خلأ کندانسور در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از بویلر بازیاب حرارت با تعداد سطوح فشار بالاتر (۲ یا ۳ سطح فشار) باعث به هم خوردن تعادل در دبی بخار توربین‌ها و بخش‌های مختلف بویلر اصلی می‌شود. بنابر این استفاده از بویلر بازیاب حرارت یک فشاره با یک مرحله بازگرم برای این کار پیشنهاد می‌شود. در صورت استفاده از این بویلر بازیاب حرارت و یک توربین گاز مدل Mitsubishi 701G2 بازده‌های خالص انرژی و انرژی و توان تولیدی به ترتیب به ۵۲/۱۹٪، ۵۰/۰۹٪ و ۴۸۵/۸ افزایش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی — نیروگاه شهید منتظری، بازتوانی، بویلر کمکی،

بویلر بازیاب حرارت، بازده انرژی

در مقایسه با هزینه احداث نیروگاه‌های گازی جدید به این نتیجه رسیدند که بازتوانی نیروگاه های موجود بسیار مقرون به صرفه تر است. اسدیان و صمدی [۱۱] در یک تحقیق دو شیوه بازتوانی جعبه هوای داغ و گرمایش آب تغذیه با استفاده از توربین‌های گاز در سیکل بخار و حالت‌های مختلف آن در نیروگاه لوشان را مورد بررسی قرار داد و پس از بررسی نتایج، با در نظر گرفتن عواملی همچون سوخت مورد استفاده نیروگاه اصلی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای اصلاحات، زمان خروج از مدار برای انجام اصلاحات، بهره برداری مستقل، بازده و جنبه‌های زیست محیطی نیروگاه، روش بازتوانی گرمایش آب تغذیه به عنوان بهترین روش برای نیروگاه پیشنهاد شد. مبینی و همکاران [۱۲] در یک تحقیق به تحلیل ترمو اقتصادی روش های موجود در انجام بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه برای نیروگاه شهید رجایی به روش پیمایشی پرداختند. توابع بازده آگرزری و قیمت تمام شده هر کیلو وات ساعت برق تولیدی به عنوان توابع هدف معرفی شدند. در پایان به این نتیجه رسیدند که بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه موازی برترین سناریو در بارهای مختلف است که در آن افزایش ۳/۴ درصدی بازده آگرزری و افزایش ۲۷ درصدی توان تولیدی واحد بخار مورد بررسی حاصل می‌شود. سربندی و همکاران [۱۳] در یک تحقیق به بررسی فنی و اقتصادی بازتوانی نیروگاه شهید منتظر قائم پرداختند. آنها با استفاده از نرم افزار ترموفلو به شبیه سازی سیکل نیروگاه در حالت های مختلف بازتوانی پرداختند. افزایش ظرفیت عملی و بازده سیکل جدید، دو شاخص ارزیابی در این روش بودند. آنها بهترین ترکیب ها و توربین های گاز از لحاظ فنی برای هریک از روش ها مشخص شد.

یکی از روش‌های بسیار جذاب بازتوانی، روش بویلر کمکی (یا بازتوانی موازی) است. در خصوص جزئیات آن در بخش بازتوانی توضیحات لازم ارائه خواهد شد. در این روش می‌توان ظرفیت توربین گاز و بویلر بازایب حرارت را در محدوده‌های متفاوتی طراحی کرد. انتخاب تعداد سطوح فشار در بویلر بازایب حرارت و همچنین روش مناسب جهت ادغام بخار تولیدی در بویلر بازایب حرارت با سیکل اصلی از مراحل مهم در طراحی سیکل جدید هستند. در این مقاله اجرای بازتوانی بویلر کمکی برای سیکل نیروگاه شهید منتظری اصفهان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. البته با توجه به اینکه مطالب مرتبط بسیار گسترده هستند، در این مقاله تنها به بررسی جامع روش بازتوانی بویلر کمکی و خصوصیات بویلر بازایب حرارت بهینه پرداخته می‌شود. در مقاله‌ای دیگر در خصوص جزئیات و اثرات اجرای طرح در سایر پارامترهای سیکل و انتخاب توربین گاز بهینه مطالب لازم ارائه شده است.

همچنین محدودیت های فنی انواع بازتوانی کلی و جزئی را بیان کرده و یک تحلیل اقتصادی برای اعمال هر یک از روش های مذکور در نیروگاه لوشان انجام دادند. مقصودی و همکاران [۵] در یک تحقیق به بررسی و تحلیل آگرزری و اعمال روش بازتوانی گرمایش آب تغذیه موازی برای نیروگاه شهید رجایی پرداختند. آنها ضمن امکان سنجی بازتوانی مذکور برای نیروگاه، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به روش تحلیل آگرزری بهینه سازی های لازم را انجام دادند و نشان دادند که استفاده از یک توربین گاز با ظرفیت ۲۵ مگاوات علاوه بر افزایش توان نیروگاه به مقدار ۷ درصد حالت عادی، بازده آگرزری نیروگاه را نیز به مقدار ۵ درصد می‌تواند افزایش دهد. زکی و دورماز^۱ [۶] در یک تحقیق به بررسی تاثیر بازتوانی یک نیروگاه بخار به روش جعبه هوای داغ در بازده و میزان تولید CO₂ پرداختند. آنها این کار را با استفاده از نرم افزار شبیه سازی ترموفلکس انجام دادند و از توربین گازهای با ظرفیت ۱۰ تا ۲۲ درصد توان سیکل بخار موجود برای این کار استفاده کردند. نتایج این شبیه سازی افزایش تقریبی ۱۱ تا ۲۷ درصدی توان تولیدی و کاهش همزمان ۷ درصدی تولید CO₂ را به همراه داشت. ولوویکز^۲ و همکاران [۷] در یک تحقیق به شبیه سازی بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه برای یک نیروگاه با ظرفیت هر واحد ۸۰۰ مگاوات در کشور هند پرداختند. آنها برای شبیه سازی از توربین گاز مدل (APG 7161 -EC) استفاده کردند. نتیجه این تحقیق نشان داد که با انجام این بازتوانی توان تولیدی به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بازده کل سیستم نیز در حالت بارنامی به مقدار ۱ درصد افزایش و از ۴۳/۵ درصد به ۴۴/۵ درصد خواهد رسید. باغستانی و همکاران [۸] در یک تحقیق به شبیه سازی سیکل نیروگاه قزوین توسط نرم افزار ترموفلکس پرداختند و با اعمال روش های بازتوانی برای نیروگاه، با استفاده از روش های تحلیل آگرزری و تحلیل آگرزری اقتصادی بهترین حالت های بازتوانی را پیشنهاد کردند. فرانکل^۳ [۹] در یک تحقیق به بررسی بهترین گزینه برای بازتوانی یک نیروگاه بخار ۳۰۰ مگاواتی در کشور روسیه پرداخت. او پس از بررسی کلیه روش های بازتوانی، روش بازتوانی کامل را به دلیل فرسودگی بویلر نیروگاه و توربین گاز مدل SGT4000-F5 را پیشنهاد کرد. طبق محاسبات آنها بازده نیروگاه از ۳۸ درصد به ۵۶/۸ درصد افزایش خواهد یافت. حسینعلی پور و همکاران [۱۰] در یک تحقیق کلی به بررسی اقتصادی بازتوانی نیروگاه های بخار در مقایسه با احداث نیروگاه‌های گازی پرداختند. آنها با برآورد هزینه های بازتوانی نیروگاه‌ها به روش‌های مختلف و مقایسه این مقدار سرمایه‌گذاری

1 Zeki and Durmaz
2 Wolowics
3 Frankle

جدید جهت افزایش تولید و افزایش بازده گفته می‌شود؛ که با اجرای این کار چند هدف به صورت همزمان دنبال می‌شوند [۱۹ و ۲۰]:

- افزایش ظرفیت تولید
- افزایش بازده کلی
- کاهش هزینه تولید برق
- افزایش عمر مفید نیروگاه
- تغییر نوع سوخت (معمولاً تبدیل ذغال سنگ، زباله یا مازوت به گاز طبیعی)
- کاهش تولید گازهای آلاینده (مخصوصاً NO_x و CO_2)

با اجرای بازتوانی و با توجه به روش انتخابی، توان تولیدی بین ۲۰ تا ۲۰۰ درصد و نرخ حرارتی نیز بین ۵ تا ۴۰ درصد بهبود می‌یابد [۲۱]. اثر کاهش نرخ انتشار گازهای آلاینده در بازتوانی نیروگاه‌های ذغال‌سنگ‌سوز بیشتر است. برای انجام بازتوانی نیروگاه‌های بخار چند روش وجود دارد [۲۲]:

- روش جعبه هوای داغ
- روش گرمایش آب تغذیه
- روش بویلر کمکی (بازتوانی موازی)
- بازتوانی کامل

در روش اول، محصولات احتراق داغ خروجی از توربین گاز به عنوان بخشی از هوای ورودی به بویلر استفاده می‌شود. این کار باعث کاهش حرارت مورد نیاز برای پیش گرم کردن می‌شود. بنابراین سوخت مصرفی بویلر کاهش می‌یابد. در روش گرمایش آب تغذیه از یک دستگاه توربین گاز و مبدل‌های حرارتی گاز-آب به موازات گرمکن‌های آب تغذیه بخاری استفاده می‌شود. در این روش با توجه به وجود گرمکن‌های قبلی، با از سرویس خارج شدن توربین گاز کمترین اثر منفی در سیکل بخار ایجاد می‌شود. در این روش توان تولیدی و بازده کل به ترتیب ۳۰ تا ۴۰ درصد و ۲ تا ۴ درصد افزایش می‌یابند [۲۳].

۴. بازتوانی به روش بویلر کمکی

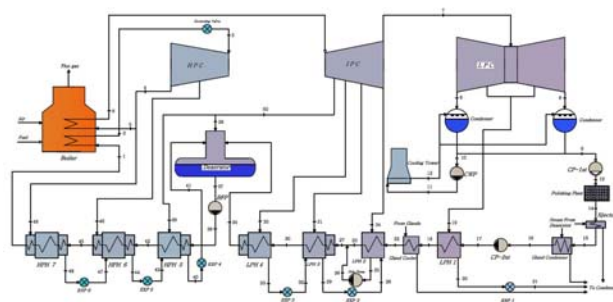
در بازتوانی به روش بویلر کمکی (بازتوانی موازی) محصولات احتراق خروجی از توربین گاز علاوه بر پیش گرم کردن آب تغذیه بویلر، به سمت یک HRSG هدایت شده و بخار مافوق گرم تولید می‌کنند. این بخار بخشی از بخار مورد نیاز توربین بخار را تشکیل می‌دهد. مقدار افزایش بازده و افزایش ظرفیت تولید در این روش متفاوت است و به ظرفیت توربین گاز و HRSG وابسته است [۲۱]. بازتوانی کامل مشابه بازتوانی موازی است، با این تفاوت که بویلر قبلی به طور کامل حذف شده و ظرفیت توربین‌های

۲. توضیح سیکل نیروگاه

نیروگاه شهید منتظری اصفهان در ۱۵ کیلومتری شمال غرب اصفهان و در کنار بزرگراه اصفهان-تهران، جنب پالایشگاه اصفهان در زمینی به مساحت ۲/۲ میلیون متر مربع احداث شده است. نیروگاه شامل ۸ واحد بخار مشابه با ظرفیت هر واحد ۲۰۰ مگاوات است که مشخصات فنی هر واحد در جدول ۱ بیان شده است. در شکل ۱ فرآیند حرارتی سیکل نیروگاه مشاهده می‌شود.

جدول (۱) مشخصات کلی واحدها [۱۴]

پارامتر	مقدار	واحد
توان تولید ناخالص	۲۰۰	MW
مصرف داخلی هر واحد	۱۳/۵	MW
دبی سوخت مصرفی	۵۴۰۰۰	$\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
نرخ حرارتی سیکل	۱۰۴۴۸/۶	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
دبی بخار خط اصلی	۶۷۰	$\text{Ton} \cdot \text{h}^{-1}$
فشار بخار خط اصلی	۱۳۰	atm
دمای بخار خط اصلی	۵۴۰	$^{\circ}\text{C}$
دمای گاز های خروجی از دودکش	۱۶۰	$^{\circ}\text{C}$
دبی هوای احتراق ورودی به بویلر	$۹/۶ \times ۱۰^۶$	$\text{N m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



شکل (۱) نمودار فرایند واحدهای بازتوانی شده نیروگاه [۱۴]

۳. بازتوانی نیروگاه های حرارتی

بر خلاف اینکه ایران با داشتن ۹ درصد ذخایر نفت و بیش از ۱۵ درصد ذخائر گاز دنیا سرشار از ذخائر انرژی‌های فسیلی است [۱۵]، اما سیاست‌های دولت به سمت افزایش بازده نیروگاه‌ها و کاهش انتشار CO_2 است [۱۶]. در این راستا، در چند سال آینده باید بازده تعداد زیادی از نیروگاه‌های حرارتی سوخت فسیلی موجود به یکی از روش‌های قابل اجرا بهبود یابد [۱۷]. یکی از راه کارهای مناسب برای افزایش بازده، بازتوانی سیکل موجود است [۱۸]. بازتوانی گزینه بسیار مناسبی جهت جایگزین کردن بویلر نیروگاه‌های با عمر بالا است. بازتوانی به اضافه کردن توربین گاز به سیکل

$$y = \frac{\dot{m}_{in,HPT}}{\dot{m}_{in,IPT}} \quad (1)$$

مقدار پارامتر y در سیکل ساده برابر $y_{sc} = 0/885$ است. تغییرات این پارامتر باعث به هم خوردن تعادل در برآیند نیروهای محوری تولیدی در توربین‌های فشار قوی و فشار متوسط می‌شود. طراحی اولیه این دو توربین به گونه‌ای است که به دلیل اینکه جهت ورود و حرکت بخار در آنها برعکس یکدیگر است، نیروهای محوری تولیدی در آنها تقریباً برابر یکدیگر بوده و لذا همدیگر را خنثی می‌کنند. به همین دلیل نیروی محوری وارد شده به پاتاقان تراست، که در حد فاصل دو توربین مذکور قرار دارد، به حداقل می‌رسد. حال در صورتی که پارامتر y نسبت به حالت طراحی تغییر کند، با توجه به اینکه نسبت فشار ورودی به توربین فشار قوی به ورودی توربین فشار متوسط معمولاً در همه شرایط ثابت است، لذا برآیند نیروی محوری تولید شده در این دو توربین نیز تغییر خواهد کرد. با توجه به توضیحات فوق، هرچه پارامتر y به مقدار متناظر در سیکل ساده نزدیکتر باشد بهتر است. پارامتر a نیز به صورت نسبت دبی جرمی بخار ورودی به توربین فشار قوی به بخار ورودی به کندانسور تعریف می‌شود:

$$a = \frac{\dot{m}_{in,HPT}}{\dot{m}_{in,CON}} \quad (2)$$

مقدار این پارامتر در سیکل ساده برابر $a_{sc} = 1/38$ است. کاهش این پارامتر به منزله تأثیر منفی در خلأ کندانسور است.

برای سیکل بازتوانی شده پارامترهای میزان سوخت مصرفی، توان تولید ناخالص و بازده‌های انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای محاسبه بازده‌های انرژی و انرژی از روابط زیر استفاده شده است [۱۲]:

$$\eta_1 = \frac{P_{gen}}{\dot{m}_f \times LHV} \quad (3)$$

$$\eta_2 = \frac{P_{gen}}{\dot{m}_f \times LHV \times \zeta} \quad (4)$$

که در آن LHV ارزش حرارتی پائین سوخ و ζ ضریب انرژی سوخت است.

برای بازتوانی سیکل نیروگاه مدنظر به روش بویلر کمکی سه طرح مجزا پیشنهاد شده است. در هر سه طرح از یک توربین گاز و یک بویلر بازیاب حرارت استفاده شده است. در ادامه ضمن تشریح هر سه طرح، تغییرات ایجاد شده در سیکل در هر سه طرح مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای شبیه سازی از نرم افزار Cycle Tempo استفاده شده است.

گاز به نحوی انتخاب می‌شود که همه بخار مورد نیاز در HRSG (ها) تولید شود. از لحاظ افزایش بازده و ظرفیت تولید، این روش بهترین روش است. بازده کلی بین ۳۰ تا ۴۰ درصد و ظرفیت تولید نیز تا ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد [۲۱].

برای بررسی رفتار کلی سیکل و اثرات بازتوانی در هر طرح، چند پارامتر تعریف می‌کنیم. ابتدا برای بررسی تغییرات ایجاد شده در بویلر اصلی پارامتری به نام پارامتر x تعریف می‌کنیم. این پارامتر به صورت نسبت حرارت دریافتی بخار بازگرم در بویلر اصلی به حرارت دریافتی بخار خط اصلی در بویلر اصلی تعریف می‌شود:

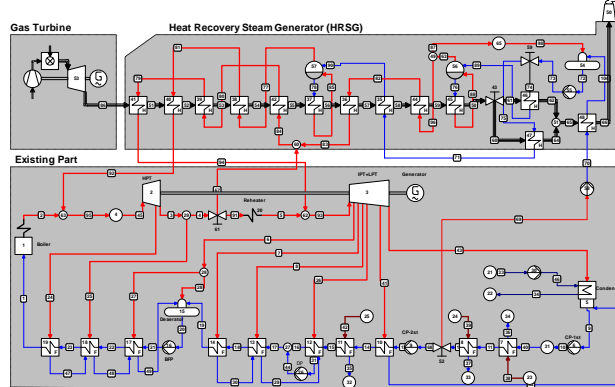
$$x = \frac{Q_{reheater}}{Q_{main-line}} \quad (1)$$

در بویلرهای موجود چیدمان فوق گرمکن‌های خط اصلی و مسیر بازگرم به گونه‌ای است که محصولات احتراق در مسیر عبور خود ابتدا از اطراف لوله‌های فوق گرمکن‌های خط اصلی عبور کرده و در ادامه از اطراف لوله‌های مربوط به فوق گرمکن‌های مسیر بازگرم می‌گذرد. در حالت عادی و در بار حداکثر دمای محصولات احتراق در ورود به فوق گرمکن بازگرم حدود $700^{\circ}C$ است. طبق دستورالعمل شرح فنی بویلر و همچنین با توجه به تجربیات چندسال گذشته در صورتی که نسبت دبی بخار مسیر بازگرم به بخار خط اصلی از مقدار عادی کمتر شود، سوختگی لوله‌های مبدل‌های داخلی بویلر را به دنبال خواهد داشت. بنابراین در طراحی‌ها این نکته باید در نظر گرفته شود. مقدار پارامتر x در حالت طراحی اولیه بویلرها برابر $x_{sc} = 0/142$ است. کاهش این پارامتر نسبت به سیکل ساده به معنی زیادتیر شدن نسبت بخار ورودی به کندانسور نسبت به دبی بخار ورودی به توربین فشار قوی است. کاهش پارامتر a نسبت به سیکل ساده بیانگر این است که برای حفظ سقف تولید ۲۰۰ مگاوات، دبی بخار ورودی به کندانسور افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر باید قدرت خنک‌کاری در برج خنک‌کن افزایش یابد. برج‌های خنک‌کن نیروگاه از نوع برج خشک بوده و برای دمای محیط $16/1^{\circ}C$ طراحی شده‌اند [۱۴]. بنابراین در دمای محیط کمتر از این مقدار و با افزایش قدرت خنک‌کاری برج خنک‌کن، کاهش پارامتر a مشکلی برای حفظ سقف تولید نخواهد بود. ولی تجربه نشان می‌دهد که بیش از ۶۵ درصد ساعات سال دمای محیط از این مقدار بیشتر است. بنابراین برای اینکه خلأ کندانسور در محدوده مجاز حفظ شود، با کاهش پارامتر a توان تولید توربین‌های بخار باید کاهش یابد.

نسبت دبی جرمی بخار ورودی به توربین فشار قوی به دبی جرمی بخار ورودی به توربین فشار متوسط با پارامتر y تعریف می‌شود:

۴.۱. طرح شماره ۱

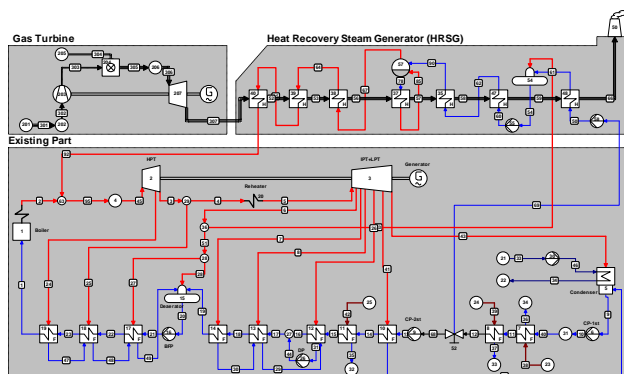
در این طرح از یک بویلر بازیاب حرارت با دو سطح فشار و یک مرحله بازگرم استفاده شده است (شکل ۲). آب تغذیه در خروجی گلندکنانسور به سمت بویلر بازیاب حرارت هدایت می‌شود. دمای آب ورودی به بویلر بازیاب حرارت در شرایط عادی 47°C است. آب در خروج از پیش‌گرمکن وارد دستگاه گاززدای بویلر بازیاب حرارت می‌شود. دمای آب تغذیه ورودی به این دستگاه حدود 164°C است. فشار کاری این دستگاه نیز $6/86\text{ bar}$ است. آب خروجی از گاززدا وارد پمپ آب تغذیه اصلی شده و به دو شاخه تقسیم می‌شود. بخشی از این آب به سمت بخش فشار قوی هدایت می‌شود. در این مسیر، آب تغذیه ابتدا در صرفه‌جوگر پیش‌گرم شده و سپس وارد درام فشار قوی می‌شود. فشار و دمای بخار خروجی از درام به ترتیب برابر 125 bar و 327°C هستند. بخار خروجی از فوق‌گرمکن‌های فشار قوی با فشار و دمای 115 bar و 547°C به سمت ورودی توربین فشار قوی هدایت می‌شود. این بخار با بخار تولیدی در بویلر اصلی مخلوط شده و وارد توربین فشار قوی می‌شود. بخشی از بخار خروجی از توربین فشار قوی در بخش بازگرم بویلر اصلی بازگرم شده و بخشی نیز به سمت بازگرم بویلر بازیاب حرارت هدایت می‌شود. این بخار با بخار تولیدی در بخش فشار ضعیف بویلر بازیاب حرارت مخلوط می‌شود. در نهایت بخار بازگرم خروجی بویلر بازیاب حرارت با بخار خروجی از بازگرم بویلر اصلی مخلوط شده و وارد توربین فشار متوسط می‌شود. بخار خروجی از این توربین به طور مستقیم وارد توربین فشار ضعیف شده و بعد از آن نیز وارد کندانسور می‌شود. برای هر سه طرح از تعدادی توربین گاز استفاده شده است. با بررسی نتایج بدست آمده برای هر توربین گاز، یکی از آنها که بیشترین بازده را خواهد داشت به عنوان توربین گاز مد نظر انتخاب می‌شود.



شکل (۲) شماتیک طرح شماره ۱ در نیروگاه شهید منتظری

۴.۲. طرح شماره ۲

در این طرح از یک بویلر بازیاب حرارت با یک سطح فشار و بدون مسیر بازگرم استفاده شده است (شکل ۳). بنابراین در بویلر بازیاب حرارت تنها بخار مورد نیاز برای ورود به توربین فشار قوی تولید می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها و محاسبات انجام شده در کلیه طرح‌ها دبی بخار ورود به کندانسور به عنوان عامل محدودکننده در نظر گرفته شده است، یعنی اینکه با ثابت در نظر گرفتن دبی بخار ورودی به کندانسور برای کلیه توربین‌ها، حداکثر توان قابل استحصال از توربین بخار بدست آمده است. از طرف دیگر دبی ممکن آب تغذیه در بویلر بازیاب حرارت نیز انتخاب شده است. عامل تعیین‌کننده حداکثر دبی آب تغذیه در بویلر بازیاب حرارت دمای دود خروجی از دودکش است. این دما 110°C انتخاب شده است [۲۱]. با توجه به اینکه حداقل دمای ممکن برای دود خروجی از دودکش معیار دبی آب تغذیه در بویلر بازیاب حرارت بوده است، لذا حداکثر استفاده از انرژی محصولات احتراق توربین گاز به عمل می‌آید. به همین دلیل محدوده بازده‌های بدست آمده برای هر توربین گاز در مقایسه با طرح اول بیشتر است. با بررسی پارامتر a در طرح شماره ۲ می‌توان گفت که مقادیر متناظر برای این پارامتر در این طرح به سیکل ساده نزدیکتر هستند. این بدان معنی است که در طرح شماره ۲ اثرات منفی بازتوانی بر خلأ کندانسور کمتر است.



شکل (۳) شماتیک طرح شماره ۲ در نیروگاه شهید منتظری

۴.۳. طرح شماره ۳

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در طرح شماره ۲ مشخص شد که در این طرح پارامتر a اختلاف اندکی با سیکل ساده دارد، اما پارامتر X اختلاف زیادی با سیکل ساده دارد. در طرح شماره ۳ به دنبال این هستیم که ضمن انتخاب شرایط کلی شبیه به طرح شماره ۲، فاصله پارامتر a با سیکل ساده به همان مقدار حفظ شده و فاصله پارامتر X نسبت به سیکل ساده نیز کاهش یابد. به همین خاطر ضمن حفظ شرایط کلی بویلر بازیاب و حرارت

نیز نسبت به سیکل ساده کاهش می‌یابد. این به معنی زیاده‌تر شدن نسبت بخار ورودی به کندانسور نسبت به دبی بخار ورودی به توربین فشار قوی است. بنابراین در این طرح اثر منفی بازتوانی بر خلأ کندانسور زیاد است.

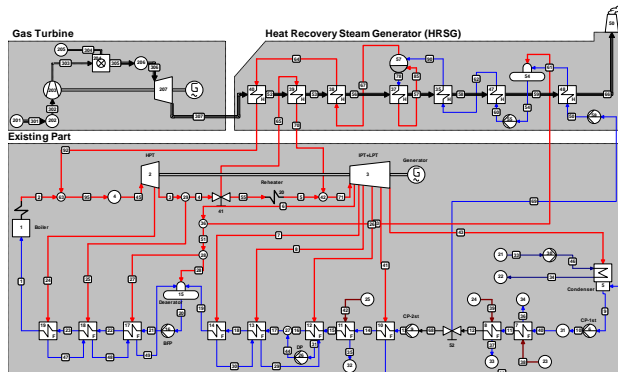
طرح شماره ۲: با توجه به اینکه در این طرح همه بخار خروجی از توربین فشار قوی در بویلر اصلی بازگرم می‌شود، بنابراین حرارت دریافتی بخار بازگرم تنها برای هر توربین گاز به توان توربین بخار وابسته بوده و در محدوده ۵۶ تا ۶۱ مگاوات است. از طرف دیگر با توجه به اینکه دبی بخار تولیدی در مسیر خط اصلی بویلر اصلی در این طرح نسبت به سیکل ساده کاهش شدیدی دارد، بنابراین حرارت جذب شده آن در بویلر اصلی نیز نسبت به سیکل ساده کاهش چشم‌گیری دارد. این امر باعث ایجاد اختلاف زیاد در پارامتر X می‌شود. در خصوص عواقب ناشی از تغییرات پارامتر X نسبت به سیکل ساده در طرح شماره ۱ مطالبی ارائه گردید. این امر باعث می‌شود تا برخلاف اینکه اثرات منفی بازتوانی در خلأ کندانسور در طرح ۲ کم است، اما این طرح جذابیت خود را از دست بدهد.

طرح شماره ۳: در طرح شماره ۳ نیز مطابق طرح شماره ۲ معیار دبی آب تغذیه در بویلر بازیاب حرارت دمای دود خروجی از آن است. همچنین معیار توان توربین بخار دبی بخار ورودی به کندانسور است. با مقایسه دبی آب تغذیه بویلر بازیاب حرارت برای هر توربین گاز مشخص در طرح‌های شماره ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که در طرح شماره ۳ دبی آب تغذیه کمتر از طرح شماره ۲ است. این در حالی است که در هر دو طرح دمای دود خروجی از بویلر بازیاب حرارت یکسان و در محدوده 110°C است. دلیل این اختلاف واضح است؛ زیرا در طرح شماره ۳ به مقدار آب تغذیه ورودی به بویلر بازیاب حرارت بخار بازگرم نیز وارد آن می‌شود. این امر دو نتیجه کلی به دنبال دارد: اولاً بر خلاف اینکه برای هر توربین گاز مشخص در هر دو طرح دبی بخار ورودی به کندانسور یکسان است، ولی توان تولیدی توربین بخار در طرح شماره ۳ بیشتر است. ثانیاً به واسطه این افزایش توان تولیدی، بازده های انرژی و اگزرژی نیز در طرح شماره ۳ بیشتر هستند.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله موضوع بازتوانی واحدهای نیروگاه شهید منتظری به روش بویلر کمکی مورد ارزیابی قرار گرفت. البته با توجه به گستردگی مباحث مرتبط با موضوع بازتوانی، در اینجا سعی شد تا تأثیر چیدمان داخلی بویلر بازیاب حرارت بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرد. برای بازتوانی سه طرح مجزا پیشنهاد شد. توضیحات لازم در خصوص هر طرح در بخش مربوطه ارائه گردید. در این قسمت نتایج مربوط به هر طرح به طور خلاصه بیان می‌شود.

مطابق طرح شماره ۲، تنها یک مرحله بازگرم به آن اضافه می‌کنیم. بنابراین از یک بویلر بازیاب حرارت یک فشاره با یک مرحله بازگرم استفاده شده است (شکل ۴). تفاوت آن با طرح شماره ۲ در این است که تنها بخشی از بخار خروجی از توربین فشار قوی از بازگرم بویلر بازیاب حرارت عبور خواهد کرد. به منظور حفظ پارامتر X، دبی بخار بازگرم در بویلر بازیاب حرارت دقیقاً برابر با دبی آب تغذیه ورودی به بویلر بازیاب حرارت است.



شکل (۴) شماتیک طرح شماره ۳ در نیروگاه شهید منتظری

۵. مشاهده نتایج و بحث

در این مقاله موضوع بازتوانی واحدهای نیروگاه شهید منتظری به روش بویلر کمکی مورد ارزیابی قرار گرفت. البته با توجه به گستردگی مباحث مرتبط با موضوع بازتوانی، در اینجا سعی شد تا تأثیر چیدمان داخلی بویلر بازیاب حرارت بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرد. برای بازتوانی سه طرح مجزا پیشنهاد شد. توضیحات لازم در خصوص هر طرح در بخش مربوطه ارائه گردید. در این قسمت نتایج مربوط به هر طرح به طور خلاصه بیان می‌شود.

طرح شماره ۱: به طور کلی با افزایش دبی آب تغذیه در بویلر بازیاب حرارت، پارامتر X مربوط به بویلر اصلی افزایش می‌یابد. البته با مقایسه مقدار متناظر با سیکل ساده می‌توان گفت که در کل در طرح شماره ۱ پارامتر X کمتر از مقدار طراحی است، اما افزایش دبی آب تغذیه در بویلر بازیاب حرارت این اختلاف را کمتر می‌کند. یکی از معایب طرح شماره ۱ این است که پارامتر Y نسبت به سیکل ساده کاهش می‌یابد. این امر به دلیل این است که بخشی از بخار فشار ضعیف تولیدی در بویلر بازیاب حرارت بدون اینکه مسیر توربین فشار قوی را عبور کرده باشد، به طور مستقیم وارد توربین فشار متوسط می‌شود. البته در طراحی بهینه بویلر بازیاب حرارت باید تعداد سطوح فشار بالاتر در نظر گرفته شود. به گونه‌ای که در طراحی جدیدترین بویلرهای بازیاب حرارت در سیکل‌های ترکیبی معمولاً از سه سطح فشار و یک مرحله بازگرم استفاده می‌شود. در طرح شماره ۱ پارامتر X

مراجع

- [1] Iran detailed statistics of electricity industry, for produce part, 2015, <http://amar.tavanir.org.ir>.
- [2] Ministry of Power of Iran, 2016, <<http://news.moe.gov.ir/Home?lang=en-US>>.
- [3] برنامه بلند مدت توسعه انرژی کشور، وزارت نیرو، شهریور ۹۳.
- [4] Shahnazari M R, Foroughi D, and Fakhrian H, "Repowering of Lowshan Power Plant", IGTC Conf, Tokyo, Japan, 2003.
- [5] Maghsoodi Mehrabani k, Sadat Fani Yazdi S, Mehrpanahi A, Nikbakht Naser Abadi S, " Optimization Of Exergy In Repowering Steam Power Plant By Feed Water Heating Using Genetic Algorithm ", Indian J.Sci.Res.1(2) : 2014,183-198.
- [6] Zeki M, Glu Y, Durmaz A, "Hot windbox repowering of coal-fired thermal power plants", Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, 2013, 37: 33 - 41.
- [7] Marcin W, Jaroslaw M, Krzysztof B, " Feedwater repowering of 800MW supercritical steam power plant", Journal of Power Technologies, 92 (2), 2012, 127-134.
- [8] Baghestani M, Ziabasharhagh M, Khoshgoftar Manesh M H, " Evaluation of repowering in a gas fired steam power plant based on exergy and exergoeconomic analysis", world Renewable Energy Congress, sweden, 2011.
- [9] Matthias F, " the standardized repowering solution for 300mw steam power plants in russia", Siemens Power Generation (PG), Germany, 2006.
- [10] حسینعلی پور م، مهریناهی ع، "بررسی اقتصادی بازتوانی نیروگاههای بخار در مقایسه با احداث نیروگاههای گازی"، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۲ شماره ۴، ۱۳۸۸، ۴۱-۶۲.
- [11] اسدیان قهقرخی م، صمدی ر، "مقایسه انواع روشهای بازتوانی در بهبود عملکرد نیروگاه لوشان"، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه کرمان، کرمان، ۲۶ اردیبهشت، ۱۳۸۶.
- [12] مبینی ک، حسینعلی پور س م، مهریناهی ع، "تحلیل ترمودینامیک بازتوانی گرمایش آب تغذیه به روش پیمایشی"، فصلنامه مکانیک هوافضا، جلد ۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۱، صفحات ۱۳ الی ۲۹.
- [13] سریندی فراهانی م، ا، رحمانی ف، آب روشن ح، "بررسی فنی اقتصادی بازتوانی یک نیروگاه بخار قدیمی در ایران"، هفتمین همایش ملی انرژی، تهران، ۱۳۸۸.
- [14] آرشیو نیروگاه شهید منتظری اصفهان.
- [15] <www.eia.doe.gov>; May2002.
- [16] Iran Detailed statistics of electricity industry, for strategic management, 2015, <http://amar.tavanir.org.ir>.
- [17] Ministry of Petroleum of Iran, <http://www.mop.ir/Portal/Home>.
- [18] Escosa MJ, Romeo ML. Optimizing CO₂ avoided cost by means of repowering. Appl Energy, 2009;86:2351-8.
- [19] Schenk H, Ehren G. Gas turbine based power plants repowering reduces emissions and increase efficiency of existing plants while re-utilizing available assets. In: Proceedings of the international gas turbine congress; 2003.
- [20] Walters AB. Power plant topping cycle repowering. Energy Eng 2008;92:49-71.
- [21] Korienic K. Combined cycle and biomass repowering, GE Energy Customer Solutions Conference, August 2010.
- [22] Walters AB. Power plant topping cycle repowering. Energy Eng 2008;92:49-71.
- [23] Kehlhofer R, Hannemann F, Stirnimann F, Rukes B. Combined-cycle Gas and Steam turbine Power plants. 3th ed. Tulsa (USA): PennWell Corporation; 2009.

در جدول ۲ نتایج کلی برای هر سه طرح به طور خلاصه ارائه شده است. همتنظر که قبلاً گفته شد، در هر طرح از چند توربین گاز استفاده شده است. نتایج بدست آمده با هر توربین گاز بررسی شده و در نهایت یکی به عنوان توربین گاز بهینه انتخاب شده است. در خصوص طرح شماره ۲ به این نتیجه رسیدیم که این طرح به دلیل اختلاف زیاد پارامتر x با سیکل ساده توجیه فنی ندارد، زیرا باعث به هم خوردن شدید پروفیل‌های دمایی بویلر اصلی می‌شود. به همین دلیل نتایج این طرح ارائه نشده‌اند. مقدار دبی آب تغذیه در بویلر بازایب حرارت به گونه‌ای انتخاب شده است که دمای محصولات احتراق توربین گاز در خروج از دودکش در محدوده مناسب باشند (حدود ۱۱۰°C). شبیه‌سازی‌ها و محاسبات به گونه‌ای انجام شده است که در هر دو طرح اثر منفی بر خلأ کندانسور حذف شده است (انحراف پارامتر a). با مقایسه بازده های خالص انرژی و انرژی، میزان افزایش توان تولیدی و تغییرات اجاد شده در پارامترهای x، y و a در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که اجرای طرح شماره ۳ نتایج بهتری به دنبال خواهد داشت. بنابر این طرح شماره ۳ به عنوان طرح بهینه برای بازتوانی نیروگاه شهید منتظری به روش بویلر کمکی پیشنهاد می‌شود.

جدول (۲) مقایسه نتایج کلی سه طرح پیشنهادی

پارامتر	طرح شماره ۱	طرح شماره ۳
مدل توربین گاز	Westinghouse 501G	Mitsubishi 701G2
دبی آب تغذیه HRSG	80 kg/s	100 kg/s
بازده انرژی	50/4	52/15
بازده انرژی	48/5	50/09
افزایش توان تولیدی	213/48 MW	285/8 MW
دمای دود خروجی HRSG	124 °C	123 °C
مقدار x	0/104	0/1455
انحراف x	-36%	+2%
مقدار y	1/035	0/968
انحراف y	+16/9%	+9/3%
مقدار a	۱/۳۸	۱/۳۸
انحراف a	0	0

تشکر و قدر دانی

در اینجا لازم می‌دانیم از مدیریت محترم نیروگاه شهید منتظری اصفهان و مخصوصاً واحد آموزش نیروگاه، آقای مهندس لطفی و آقای مهندس عباسی به خاطر همکاری‌هایشان کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.