پنجمین کنفرانس بین المللی مطالعات بین رشته ای در مدیریت و مهندسی
۱۴ تیر ۱۴۰۱ | محل برگزاری: دانشگاه تهران
5th International Conference on Interdisciplinary Studies in Management & Engineering (ICISME-2022)
5 July 2022 | University of Tehran
OxfordCert Universal

ارزیابی قیمت تجهیزات اصلی نیروگاه های بخاری و ارائه روابطی جهت تخمین آنها

حمید آب‌روشن
کارشناس انرژی، شرکت مهندسی آسیاوات، تهران، ایران
pabroshan@gmail.com

چکیده

هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات نیروگاه‌های بخار از جمله اطلاعاتی هستند که برای بررسی به‌صرفه بودن یا نبودن یک پروژه (اعم از ارتقاء یا ساخت واحدی جدید) ضروری می‌باشند. دسترسی به این اطلاعات مستلزم استعلام طرحی خاص که مشخصات فنی‌اش مشخص است از شرکت‌های سازنده می‌باشد. هنگامی که هدف مقایسه نتایج تحلیل اقتصادی بین چندین طرح است، دسترسی به قیمت اولیه تجهیزات دشوارتر خواهد شد. بنابراین نیاز به روابطی که بتوانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری را تخمین بزنند احساس می‌شود. در این مقاله، روابطی برای تخمین قیمت اولیه تجهیزاتی چون بویلر، مجموعه توربین بخار (توربین و ژنراتور)، چند نوع سیستم خنک‌کن، هیترهای آب تغذیه و تجهیزات ولتاژ ارائه شده است. این روابط که بر مبنای داده‌های نرم‌افزاری توسعه یافته‌اند، به کمک پارامترهای اصلی سیکل (مانند توان تولیدی، فشار و دمای بخار اصلی، فشار کندانسور، دمای طراحی محیط و نوع سوخت) قیمت‌ها را پیش‌بینی می‌نمایند. این روابط در محدوده ظرفیت ۱۵ الی ۱۰۰۰ مگاوات اعتبار دارند.

واژگان کلیدی: هزینه سرمایه گذاری، نیروگاه بخار، تحلیل اقتصادی ، بویلر، توربین بخار

www.SID.ir

مقدمه

نیروگاهای حرارتی سهم بزرگی از تولید الکتریسیته در جهان را به خود اختصاص داده‌اند به نحوی که در سال ۲۰۱۶ به میزان ۶۷/۳ درصد از برق تولیدی سراسر کره زمین از سوخت‌های فسیلی (و زیست توده‌ها) حاصل گردید (آژانس جهانی انرژی ، ۲۰۱۶). در ایران این رقم در سال ۱۳۹۶ معادل ۹۲/۶٪ بوده است (آمار تفصیلی صنعت برق ایران، ۱۳۹۶). از میان نیروگاه‌های حرارتی، نیروگاه‌های سیکل بخار از اهمیت خاصی برخوردارند. سه دلیل عمده برای این اهمیت عبارتند از: (۱) تولید ۲۹/۳٪ از برق کشور (رتبه دوم بعد از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی)، (۲) توانایی سوزاندن سوخت‌های سنگین مانند مازوت و زغال‌سنگ، (۳) اهمیت آنها در تأمین بار پایه .

از مهمترین نکات در ساخت و احداث یک نیروگاه، بررسی به صرفه بودن طرح از نظر اقتصادی می‌باشد. از اینرو در فازهای اولیه طراحی نیروگاه‌ها می‌بایست تحلیل فنی- اقتصادی قابل اتکایی صورت پذیرد. این تحلیل‌ها مختص احداث نیروگاه نبوده و برای ایجاد تغییرات و اعمال اصلاحات در یک نیروگاه حرارتی موجود نیز صادق است. در تحلیل اقتصادی یک طرح، دو جنبه می‌بایست با دقت قابل قبولی بصورت کمّی مورد توجه قرار گیرند: مسائل فنی (مانند تغییرات در میزان تولید الکتریسیته یا مصرف سوخت) و مسائل اقتصادی (مانند هزینه‌های اولیه، هزینه‌های تعمیرات و هزینه‌های سوخت مصرفی). مشخصاً برای هر طرحی در مراحل اولیه نیز تخمین خوبی از موارد فنی وجود دارد. در زمینه مسائل اقتصادی اما عدم اطیمنان بیشتری وجود دارد به ویژه اینکه اغلب موارد آن به زمان و شرایط ملی یا جهانی بستگی دارند. با اینحال می‌توان در محاسبات فنی- اقتصادی برای قیمت سوخت، قیمت برق، نرخ تورم و ... مقادیری را بر مبنای گزارشات اقتصادی کشوری یا جهانی مدنظر قرار داد (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۲). از مواردی که یافتن اطلاعات درباره‌اش کار دشواری است، قیمت سرمایه گذاری تجهیزات است. تحلیلهای مختلفی در زمینه اثرات قیمت سوخت بر اقتصاد نیروگاه ها صورت گرفته است، مانند مشیری و همکاران (۱۳۹۷). دسترسی به قیمت تجهیزات فقط از طریق شرکت‌های سازنده ممکن است و این شرکت‌ها نیز معمولاً قیمت‌ها را در ازای استعلام از طرف سازمانی که احتمال خرید از آنها را داشته باشد می‌دهند. به همین دلیل به درخواست بسیاری از شرکت‌ها و دانشگاه‌ها در زمینه استعلام قیمت تجهیزات نیروگاهی پاسخی داده نمی‌شود. از طرف دیگر، شرکت‌های سازنده غالباً قیمت را برای طرح فنی خاصی ارائه می‌کنند. این در حالی است که برای محاسبات فنی- اقتصادی طرح‌های نیروگاهی داشتن روابطی که بتوان بر مبنای آنها قیمت تجهیزات را برای مشخصات فنی مختلفی محاسبه نمود، بسیار مفیدتر است.

در مستندات قابل دسترس روابطی برای محاسبه هزینه اولیه بویلر کمکی موجود است. البته برخی از این روابط به نحوی است که قیمت بخار تولید شده را بر حسب کیلوگرم می‌دهد که هزینه اولیه بویلر و سوخت در آن مستتر است. به عنوان نمونه رابطه‌ای برای محاسبه بخار پروسس ارائه شده است که قیمت هر کیلوگرم آن را بر مبنای دبی و فشار بخار محاسبه می‌نماید (Ulrich & Vasudevan, 2006). در بسیاری از موارد، از داده‌های موجود یک یا چند نیروگاه استفاده می‌شود. بطور نمونه، برای دو نیروگاه ۳۰۷ و ۵۰۰ مگاواتی با سوخت زغال‌سنگ این اطلاعات ارائه شده است (Rosen & Dincer, 2003). تنها نکته‌ای که می‌توان از این داده‌ها برداشت نمود این است که هزینه اولیه بویلر در این دو نیروگاه بین ۳۱/۵ تا ۳۴ درصد از هزینه کل بوده است. روابط دقیقتری نیز در این رابطه وجود دارند که از آن جمله رابطه‌ای است که هزینه اولیه بویلر را به دبی، دما و فشار بخار و نیز راندمان بویلر و افت فشار بخار در بویلر مرتبط می‌نماید (Xiong et al., 2012). از دیگر روابطی که در مقالات استفاده می‌شود، رابطه‌ای است که هزینه سرمایه‌گذاری بویلر را بر مبنای دبی، فشار و دمای بخار اصلی بعلاوه راندمان بویلر و دبی، دمای ورود و دمای خرج بخار ری‌هیت محاسبه می‌نماید (باغ شیخی و سیادتی ، ۲۰۱۶).

برای توربین بخار به عنوان دیگر تجهیز مهم در نیروگاه‌های بخاری نیز روابطی در منابع موجود است. در یکی از این روابط، هزینه اولیه توربین بخار بر حسب توان تولیدی، دمای ورودی و راندمان ایزنتروپیک طبقات قابل تخمین است (Xiong et al.,

www.SID.ir

2012). بسیاری از روابط یا نمودارهای دیگر در این زمینه چندان کامل نیستند و پارامترهای کمی را دخیل دانسته‌اند. مثلاً در گزارش طرف DOE/NETL هزینه اولیه توربین بخار (بعلاوه کندانسور) فقط بر حسب ظرفیت تولید نمایش داده شده است (Loh et al., 2002). با توجه به داده‌های دو نیروگاه ذکر شده توسط Rosen & Dincer (2003) توربین بخار بین ۲۳ الی ۳۰ درصد از هزینه کل را تشکیل داده است.

در زمینه تخمین قیمت سیستم‌های خنک‌کن برخی منابع مهمترین عامل را ظرفیت آنها دانسته‌اند (Zhai & Rubin, 2010). در مقاله مذکور نشان داده شده است که دمای محیط تأثیر چندانی بر هزینه سرمایه‌گذاری سیستم‌های خنک‌کننده مرطوب و خشک ندارد. نسبت هزینه اولیه یک سیستم خشک به سیستم مرطوب در حدود ۲/۵ ذکر شده است. به همین دلیل، در زمینه تخمین قیمت اولیه سیستم خنک‌کن شفافیت چندانی در منابع وجود ندارد. در واقع علت این امر انواع مختلف آنها و تفاوت‌های بسیار زیاد در هزینه‌های هر یک با دیگری است. به همین دلیل غالباً به ارائه قیمت کندانسور پرداخته‌اند. در (Rosen & Dincer, 2003) قیمت یک کندانسور را میتوان از راندمان کندانسور، کارایی حرارتی کندانسور، دمای آب خنک‌کن ورودی و خروجی، دمای بخار ورودی، دبی آب خنک‌کن، و دمای محیط بدست آورد. در رابطه‌ای دیگر، قیمت کندانسور به کل حرارت منتقل شده، دبی آب خنک‌کن، اختلاف دمای آب خنک‌کن ورود و خروج، دمای متوسط آب خنک‌کن و دمایی که احتمالاً دمای بخار ورودی به پوسته کندانسور است مرتبط دانسته شده است (Xiong et al., 2012). روابط ساده‌تری نیز در این زمینه وجود دارند که قیمت کندانسور را فقط به ظرفیت وابسته کرده‌اند که البته برای ظرفیت‌های کوچکتر ارائه شده است (Lemmens, 2016).

در زمینه هیترهای آب تغذیه نیز روابطی به منظور تخمین قیمت اولیه آنها ارائه شده است. رابطه‌ای از مرجع (Olsommer, 1998) استخراج شده است که قیمت هیترها را (به عنوان یک مبدل حرارتی بطور عمومی) بر مبنای حرارت منتقل شده و اختلاف دمای لگاریتمی محاسبه می‌نماید (Escosa & Romeo, 2009). البته این رابطه برای هیترهای آب تغذیه بطور خاص ارائه نشده و تفاوتی بین یک مبدل پوسته لوله و یک مبدل صفحه‌ای که اختلاف دما و انتقال حرارت یکسانی دارند قائل نشده است به همین دلیل قطعاً دقت بالایی ندارد. با اینحال به دلیل عدم وجود روابط در بسیاری از پژوهش‌های داخلی و خارجی (Romeo et al., 2009 و مهرپناهی، حسینعلی پور و سیجانیوندی، ۱۳۹۲) استفاده شده است. سرمایه اولیه مورد نیاز برای هیترهای آب تغذیه یک نیروگاه بخار در رابطه دیگری به پارامترهای مختلفی همچون تعداد مبدل‌ها، عمر نامی نیروگاه، نرخ انرژی، نرخ تخفیف بازار، نسبت هزینه‌های تعمیر و نگهداری به هزینه اولیه، و نسبت قیمت دست دوم به قیمت اولیه مرتبط دانسته شده است (Söylemez, 2011). از شیوه‌های دیگر برای محاسبه قیمت اولیه هیترهای آب تغذیه استفاده از توازن قیمت کل سیکل و در نظر گرفتن نسبت خطی بین قیمت و ظرفیت هر تجهیز است (Mabrouk et al., 2010) که به نظر می‌رسد خلاء زیادی دارد. شاید از بهترین روابط در زمینه تخمین قیمت هیترهای آب تغذیه فرمولی است که قیمت را بر حسب حرارت منتقل شده، اختلاف دمای ترمینال، و افت فشار مسیر بخار و آب تغذیه بیان می‌نماید (Xiong et al., 2012).

بطور کلی، برای تخمین هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات اصلی نیروگاه‌های بخار روابط چندانی در منابع وجود ندارد. اغلب محاسبات اقتصادی در این زمینه بر مبنای داده‌های اقتصادی یک نیروگاه و نهایتاً تطبیق با ظرفیت مورد نیاز به کمک یک رابطه توانی است (Lemmens, 2016). در میان مستنداتی که مرور گردید، تنها روابط ارائه شده توسط Xiong et al. (2012) و باغ شیخی و سیادتی (۲۰۱۶) هزینه اولیه تجهیزات را با داشتن جزئیات بیشتر میسر می‌نمایند. با اینحال این روابط نیز زمانی مفید خواهند بود که اطلاعات فنی دقیق‌تری از اجزای نیروگاه در دسترس باشد. در بسیاری از مواقع، در مراحلی از محاسبات چنین اطلاعاتی موجود نیستند یا اساساً مورد توجه مهندسین یا محققین در پروژه‌ای خاص قرار ندارند. بنابراین تنها راهی که باقی می‌ماند استفاده از روابط بسیار ساده‌تر با خطای بالاست که عملاً تحلیل اقتصادی را بی ارزش می‌نماید.

www.SID.ir

در مطالعه حاضر، سعی شده است مشکل عدم دسترسی به روابطی برای محاسبه هزینه اولیه تجهیزات اصلی یک نیروگاه بخاری بر طرف شود. در این راستا تمامی اطلاعاتی که برای محاسبه قیمت لازم است، داده‌هایی هستند که در ابتدایی‌ترین مراحل طراحی یک واحد نیروگاهی یا ایجاد اصلاحات در یک تجهیز نیروگاهی در دسترس می‌باشند. بطور مثال، برای محاسبه دقیق‌تر قیمت هیترهای آب تغذیه در روابط پیشین می‌بایست میزان انتقال حرارت، اختلاف دمای ترمینال، و افت فشار داخل لوله‌ها و پوسته برای هر یک از هیترها مشخص باشد. ولی در شیوه ارائه شده در این مقاله تنها کافی است ظرفیت واحد، و دما و فشار بخار اصلی مشخص باشد تا تخمینی قابل قبول از مجموع سرمایه مورد نیاز برای هیترهای آب تغذیه واحد نیروگاهی ارائه گردد. بنابراین در پژوهش حاضر روابطی بر پایه داده‌های کلی نیروگاه تهیه گردیده است. این روابط به تفکیک برای بویلر، توربین بخار، سیستم خنک‌کن (خشک، مرطوب، هوا خنک و یکبارگذر)، هیترهای آب تغذیه و تجهیزات ولتاژ ارائه شده است.

روش تحقیق

ارائه روابط قابل اتکا برای قیمت تجهیزات نیازمند دسترسی به داده‌های سازنده‌های تجهیزات نیروگاهی است که همانطور که در مقدمه اشاره شد کاری عملاً نشدنی است. به همین منظور از پایگاه داده‌های نرم‌افزاری در زمینه نیروگاهی استفاده شده است. نرم‌افزار ترموفلو از جمله ابزارهای قوی است که برای انجام محاسبات ترمودینامیکی و انتقال حرارتی نیروگاه‌ها قابلیت‌های فراوانی دارد. این نرم‌افزار اما تخمین اقتصادی بسیار قدرتمندی را نیز شامل می‌شود. در حقیقت، داده‌های اقتصادی مستتر در این نرم‌افزار از صدها نیروگاه و سازنده جهانی استعلام شده‌اند. لیکن به دلیل قیمت بالای این نرم‌افزار و عدم دسترسی و عدم آشنایی با نحوه کارکرد صحیح همگان با آن، در این مقاله روابط پنهان در آن ساده‌سازی و ارائه شده است. به این منظور بیش از ۵۰۰ سیکل بخار در نرم‌افزار طراحی شده و داده‌های اقتصادی آنها دسته‌بندی گردیدند. در ادامه به یافتن روابط بین قیمت تجهیزات و پارامترهای مستقل پرداخته شد.

نرم‌افزار ترموفلو برای محاسبه قیمت تجهیزات گروه‌های مختلفی دارد که بر مبنای ظرفیت واحد قابل تعیین است. در حقیقت روابطی که برای تخمین قیمت برای یک نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی وجود دارد متفاوت است با آنچه برای یک نیروگاه ۳۰۰ مگاواتی استفاده می‌نماید. از اینرو بررسی‌های انجام شده با در نظر گرفتن محدوده ظرفیت یک واحد نیروگاهی صورت پذیرفته است. تجهیزات مختلفی که هزینه سرمایه‌گذاری آنها از خروجی‌های مدلسازی توسط نرم‌افزار استخراج شده است عبارتند از: بویلر، مجموعه توربین بخار (توربین و ژنراتور)، مجموعه هیترهای آب تغذیه، سیستم خنک کن، و تجهیزات ولتاژ (تولید و انتقال). لازم به ذکر است که برای سیستم خنک‌کن مجموع قیمت همه تجهیزات مرتبط مدنظر قرار گرفته اند که بسته به نوع سیستم خنک‌کن (یکبارگذر، خشک اجباری، مرطوب، و هوا خنک) متفاوت است. برای سیستم یکبارگذر فقط قیمت کندانسور و CW (Cooling Water) پمپ ، برای سیستم‌های مرطوب و خشک اجباری قیمت کندانسور، برج‌ها، و CW پمپ‌ها، و برای سیستم کندانسور هوا خنک (ACC - Air Cooled Condenser) قیمت کندانسور درج شده است.

پارامترهایی که وابستگی هزینه اولیه تمامی تجهیزات فوق نسبت به آنها ارزیابی گردیده است عبارتند از: توان تولیدی واحد، فشار بخار اصلی سیکل، دمای بخار اصلی سیکل، فشار کندانسور، نوع سیستم خنک‌کن، دمای محیط، و نوع سوخت مصرفی واحد. مشخصاً تمامی تجهیزات وابستگی به تمامی این پارامترها نخواهند داشت. بطور مثال عدم وابستگی قیمت تجهیزات ولتاژ به فشار کندانسور از پیش مشخص و واضح است. با اینحال تمامی موارد مورد بررسی قرار گرفتند تا پارامتری کلیدی در تخمین قیمت از قلم نیافتد. نکته‌ای بدیهی که در ارتباط با این پارامترها لازم به یادآوری است، اینکه اینها مقادیر طراحی هستند. به

www.SID.ir

عنوان مثال، قیمت تجهیزات بر مبنای دمای طراحی محیط قابل ارزیابی است در حالیکه این قیمت‌ها ارتباطی به دمای لحظه‌ای محیط ندارند.

قیمت تمامی تجهیزات بر مبنای قیمت هر کیلووات ظرفیت نیروگاه در برابر پارامترهای مستقل مذکور ترسیم گردید. برخی از نمودارها پراکندگی نسبتاً زیادی داشتند. با اینحال، به کمک ابزار برازش منحنی، تابعی که کمترین خطا در تخمین قیمت‌ها داشت حاصل شد. در انتخاب فُرم توابع دقت شده است که در عین حفظ دقت و کاهش خطای برازش، سادگی و کاربردی بودن تابع نیز مدنظر قرار گیرد. به بیان دیگر، اگر تابع چند جمله‌ای درجه ۲ ایی نموداری را با خطای ۸٪ پیش‌بینی نماید، این تابع به تابع چند جمله‌ای درجه ۶ ای که خطای ۳٪ دارد ترجیح داده شده است.

تمامی قیمت‌ها ابتدا بر پایه ظرفیت‌های تولید مختلف و با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها (دمای محیط، دما و فشار بخار اصلی، فشار کندانسور، و نوع سوخت) و همچنین برای سیستم خنک‌کن یکبارگذر محاسبه شدند. سپس اثر تغییر این پارامترها و نیز تغییر نوع سیستم خنک‌کن به صورت ضریب تصحیحی مورد بررسی قرار گرفت. به عبارت دیگر، قیمت نهایی هر یک از تجهیزات به شکل رابطه زیر استخراج گردیده است:

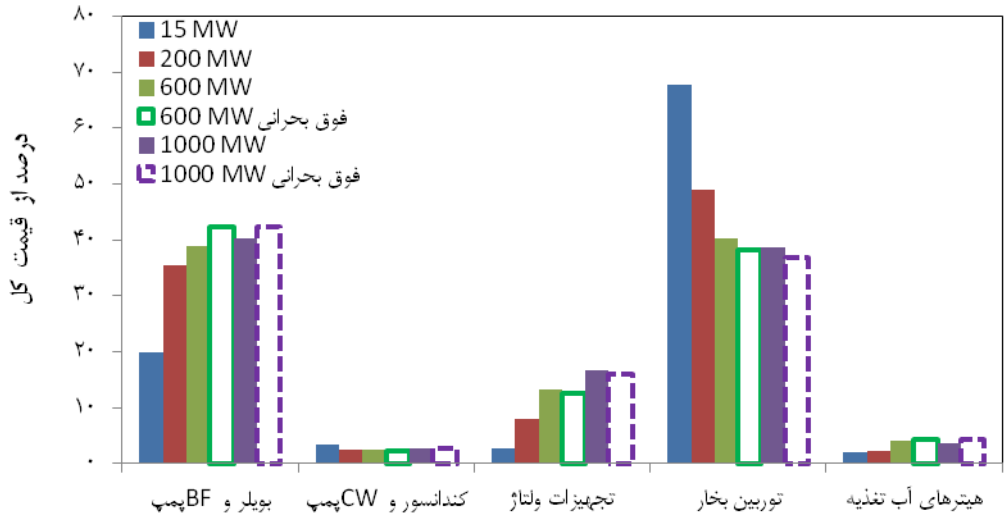
قیمت تجهیز= [(ضریب تصحیح فشار بخار) × (ضریب تصحیح دمای بخار) × (ضریب تصحیح فشار کندانسور) × (ضریب تصحیح دمای محیط) × (ضریب تصحیح نوع سوخت) × (ضریب تصحیح نوع سیستم خنک‌کن)] × (قیمت تجهیز بر پایه ظرفیت تولید)

از آنجا که محاسبات انجام شده به کمک نرم‌افزار ترموفلو نسخه ۲۰ (متعلق به سال ۲۰۱۰) صورت گرفته است، این قیمت‌ها مربوط به سال ۲۰۱۰ می‌باشند. به منظور قابل استفاده کردن روابط در سایر سالها، برخی از مدلسازی‌ها به کمک نسخه‌های ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۲۴ نیز تکرار شدند تا الگوی تغییر قیمت‌ها با گذر زمان مشخص گردد. در بخش یافته‌ها (قسمت ۸) بیشتر در این باره توضیح داده شده است. بنابراین می‌بایست در رابطه بالا، ضریب تصحیح دیگری نیز برای اصلاح زمانی قیمت‌ها افزوده شود.

یافته ها

اگرچه عمده قیمت یک نیروگاه بخاری را بویلر، توربین، تجهیزات ولتاژ و گاهاً سیستم خنک‌کننده تشکیل می‌دهند ولی قیمت هیترهای آب تغذیه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. هزینه پمپ‌های آب تغذیه بویلر (Boiler Feed Pump- BFP) در قیمت بویلر، ژنراتور در قیمت توربین و پمپ آب خنک‌کن گردشی نیز در سیستم خنک‌کاری گنجانده شده است. در شکل (۱) سهم هر یک از این تجهیزات در قیمت کل تجهیزات اصلی یک واحد نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در ظرفیت‌های پایین عمده هزینه مربوط به توربین بخار است. توربین بخار در ظرفیت ۱۵ مگاوات در حدود ۶۸٪ و بویلر ۲۰٪ از هزینه‌های اولیه را به خود اختصاص داده‌اند.

www.SID.ir



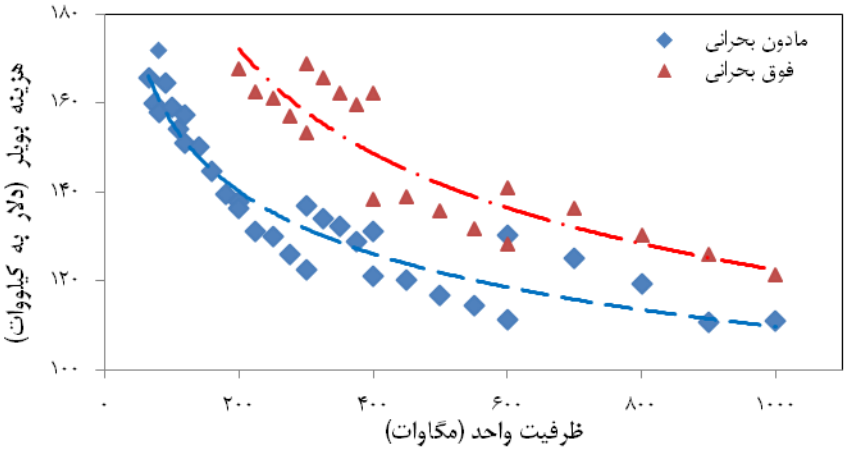
شکل ۱. درصد هزینه اولیه هر یک از تجهیزات اصلی نسبت به کل هزینه تجهیزات اصلی برای ظرفیت‌های مختلف (سیستم خنک‌کن یکبارگذر می‌باشد.)

با افزایش ظرفیت واحد، شرایط معکوس می‌شود و به تدریج بویلر هم قیمت توربین و در برخی موارد (۱۰۰۰ مگاوات) کمی هم بیشتر خواهد شد. تجهیزات مربوط به ولتاژ (تولید و انتقال) هم سهم قابل ملاحظه‌ای در قیمت‌ها دارند (از ۲/۵ تا ۱۶ درصد). هیترهای آب تغذیه اما با سهمی برابر ۲ تا ۴/۴٪ کمترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. بحث سیستم‌های خنک‌کن در بخش‌های آتی به تفصیل مورد توجه قرار خواهد گرفت لیکن سیستم خنک‌کن یکبارگذر به عنوان ارزانترین سیستم خنک‌کن از نظر سرمایه اولیه، بین ۲/۴ و ۳/۵ درصد از قیمت‌ها را صرف نموده است. سهم قیمت تجهیزات برای دو سیکل فوق‌بحرانی نیز به منظور مقایسه ارائه گردیده است.

۱- اثر ظرفیت واحد بر قیمت‌ها

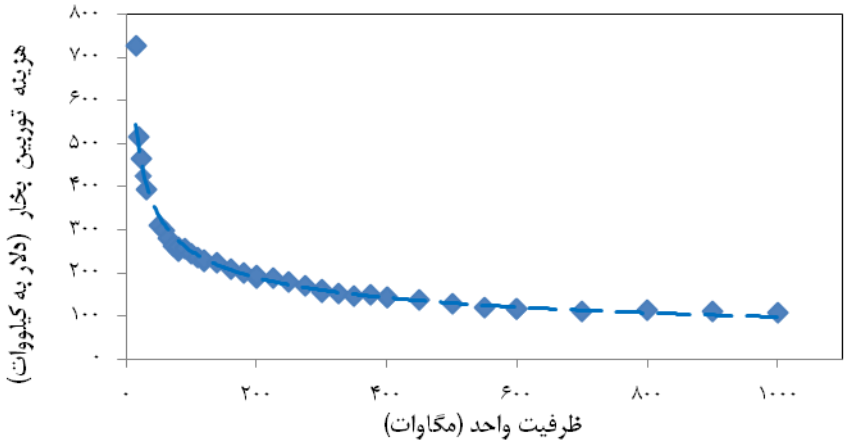
اولین و مهمترین پارامتری که بر قیمت تمامی تجهیزات یک نیروگاه بخار اثر می‌گذارد، ظرفیت تولید الکتریسیته آن واحد است. این مسأله در شکل (۱) نشان داده شد اما در این قسمت قیمت هر یک از تجهیزات به ازای هر کیلووات ظرفیت نمایش داده خواهد شد. همگی قیمت‌ها برای سال ۲۰۱۰ به عنوان سال پایه و بر حسب دلار بوده و در ادامه ضریب تصحیحی جهت یافتن قیمت‌های سالهای دیگر ارائه خواهد شد. تمامی محاسبات برای فشار کندانسور ۰/۰۷ bar انجام شده مگر در مواردی که خلاف آن ذکر گردد.

www.SID.ir



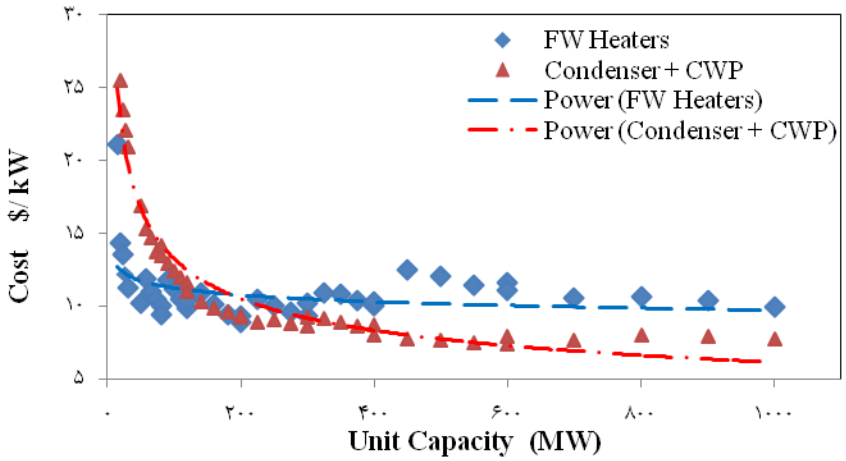
شکل ۲. قیمت بویلرهای مادون بحرانی و فوق بحرانی به ازای هر kW بر حسب ظرفیت واحد (خطوط نمایانگر تابع میانیابی می‌باشند.) (سال ۲۰۱۰)

همانطور که از شکل (۲) ملاحظه می‌گردد، با افزایش ظرفیت واحد، قیمت هر کیلووات برای بویلر تقریباً بصورت نمایی کاهش می‌یابد. البته مشخصاً قیمت کل بویلر (که در ظرفیت ضرب می‌شود) افزایش خواهد یافت که این افزایش تا حدودی خطی است. نسبت قیمت یک بویلر فوق‌بحرانی به بویلر مادون‌بحرانی در همان ظرفیت هم بطور تقریبی ۲۵٪ بیشتر است که روابط هر یک از آنها در ادامه ارائه خواهد شد. توربین بخار به عنوان پر هزینه‌ترین تجهیز اصلی در یک نیروگاه بخار نیز همانند بویلر با افزایش ظرفیت، قیمت به ازای هر kW اش کاهش می‌یابد که این تنزل در ظرفیت‌های پایین با شیب شدیدی همراه است. لازم به ذکر است که قیمت توربین واحدهای فوق‌بحرانی و مادون بحرانی تفاوت چندانی ندارند. در شکل (۴) نیز قیمت سیستم‌خنک‌کننده و نیز قیمت هیترهای آب تغذیه نشان داده شده است. هیترهای آب تغذیه تقریباً وابستگی ضعیفی به ظرفیت واحد دارند و عملاً قیمتشان در اکثر ظرفیت‌ها بین ۱۰ تا ۱۴ دلار در هر kW می‌باشد. سیستم خنک‌کننده یکبارگذر نیز با افزایش ظرفیت بصورت نمایی کاهش می‌یابد.

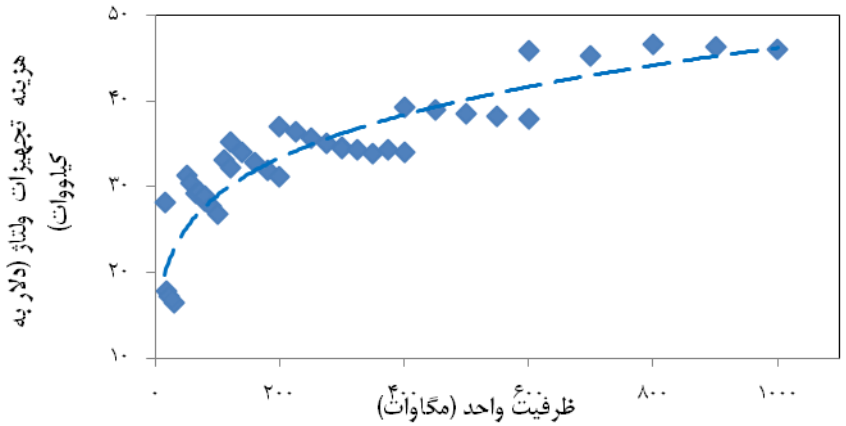


شکل ۳. قیمت پکیج توربین به ازای هر کیلووات ظرفیت واحد (سال ۲۰۱۰)

www.SID.ir



شکل ۴. قیمت سیستم خنک کننده یکبارگذر و هیترهای آب تغذیه (سال ۲۰۱۰)



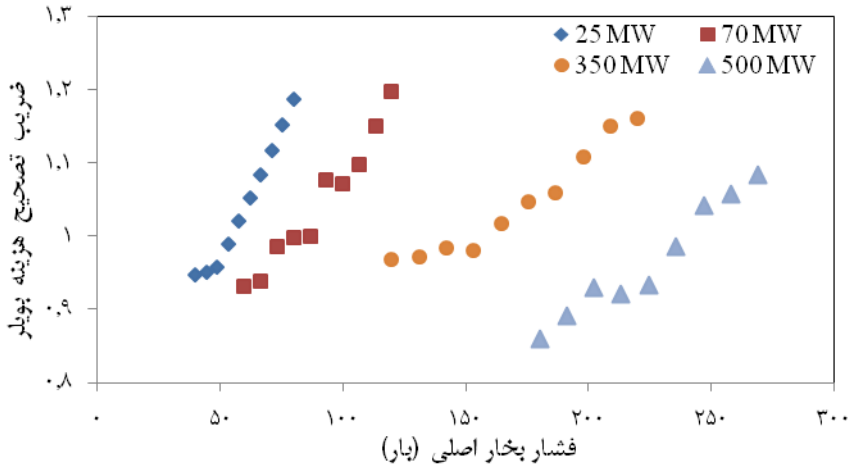
شکل ۵. قیمت تجهیزات تولید و انتقال ولتاژ به ازای هر kW برای ظرفیت‌های مختلف (سال ۲۰۱۰)

دیگر موردی که سهم قابل توجهی از قیمتها را به خود اختصاص می‌دهد، تجهیزات مربوط به ولتاژ است که در شکل (۵) به نمایش در آمده است. این تجهیزات تنها تجهیزاتی هستند که بر خلاف تجهیزات مکانیکی، با افزایش ظرفیت قیمت هر کیلووات آنها افزایش می‌یابد.

۲- تأثیر فشار بخار اصلی سیکل بر قیمت‌ها

فشار بخار اصلی سیکل یک واحد بخار از پارامترهای تعیین کننده در طراحی می‌باشد. در زمینه قیمت تجهیزات اما می‌توان با قاطعیت گفت که این پارامتر نباید اثری بر قیمت سیستم خنک‌کننده داشته باشد. بررسی‌ها نشان دهنده این مطلب است که قیمت بویلر و هیترهای آب تغذیه یک واحد نسبت مستقیمی با فشار بخار اصلی دارند. قیمت این دو تجهیز اصلی بسته به ظرفیت واحد می‌توانند تا ۲۰٪ کمتر یا بیشتر از قیمتهای ارائه شده در بخش ۱ باشند. جالب اینکه بر خلاف باور اولیه برخی افراد، قیمت توربین بخار با افزایش یا کاهش حداکثر فشار بخار تولیدی سیکل تغییر چندانی نمی‌کند (کمتر از ۲٪). ضریب تصحیحی که برای قیمت بویلر می‌بایست اعمال شود تا قیمت‌ها بر مبنای فشار بخار اصلی تعدیل شوند در شکل (۶) آورده شده است. رفتار ضریب تصحیح قیمت هیترهای آب تغذیه نیز به همین شکل است.

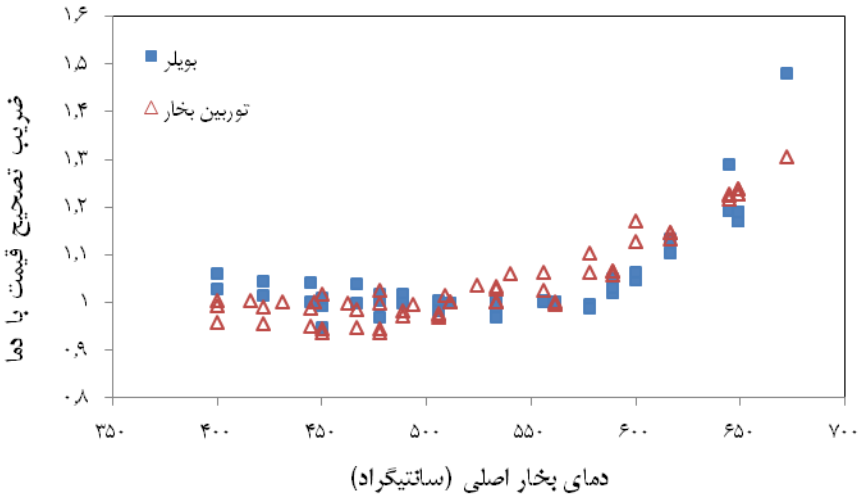
www.SID.ir



شکل ۶. ضریب تصحیح فشار بخار اصلی برای قیمت بویلر

۳- تأثیر دمای بخار اصلی سیکل بر قیمت‌ها

دمای بخار اصلی نیز در طراحی ترمودینامیکی یک سیکل بخار دارای اهمیت بسیار زیادی است. بررسی‌ها نشانگر این مطلب است که دمای بخار اصلی بر قیمت تمامی تجهیزات اصلی مکانیکی اثرگذار است. در شکل (۷) تأثیر این پارامتر بر قیمت بویلر و توربین بخار برای تمامی محدوده‌های ظرفیت یک واحد مشهود است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش دمای حداکثر سیکل، قیمت بویلر با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد. تا جایی که در دماهای طراحی‌ای در حدود ۵۰۰ الی ۵۴۰ درجه سانتیگراد کمترین قیمت بویلر بدست خواهد آمد. دماهای بالاتر به علت استفاده از آلیاژهای متفاوت، قیمت‌های بیشتری را به همراه خواهد داشت.

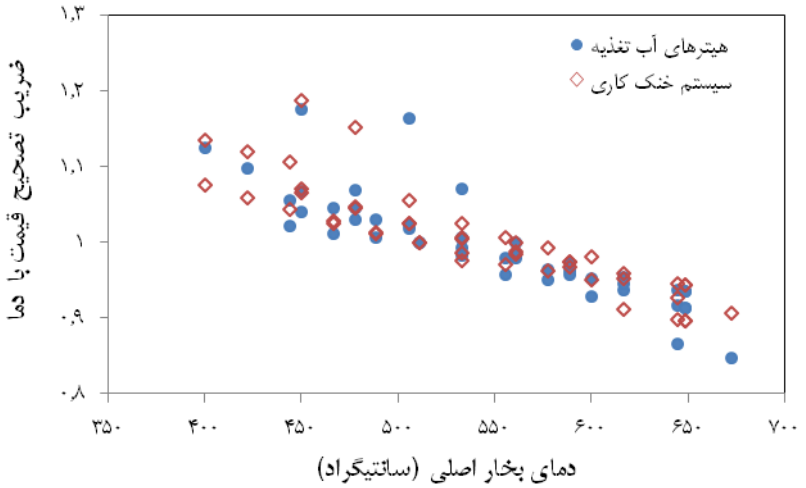


شکل ۷. ضریب تصحیح دمای بخار اصلی برای قیمت مجموعه بویلر و مجموعه توربین

قیمت مجموعه توربین بخار نیز تا حدی مشابه بویلر عمل می‌کند با این تفاوت که تا حدود ۵۱۰ °C تقریباً قیمت توربین اثری از تغییرات دما نخواهد داشت و فقط بر اساس شکل (۳) بر مبنای ظرفیت قیمتش تعیین می‌گردد. ولی در دماهای بالاتر از ۵۱۰ درجه سانتیگراد افزایش قیمت تا ۳۰٪ نیز امکان‌پذیر است. در شکل (۸) نیز اثر دمای بخار اصلی واحد بر هیترها و سیستم

www.SID.ir

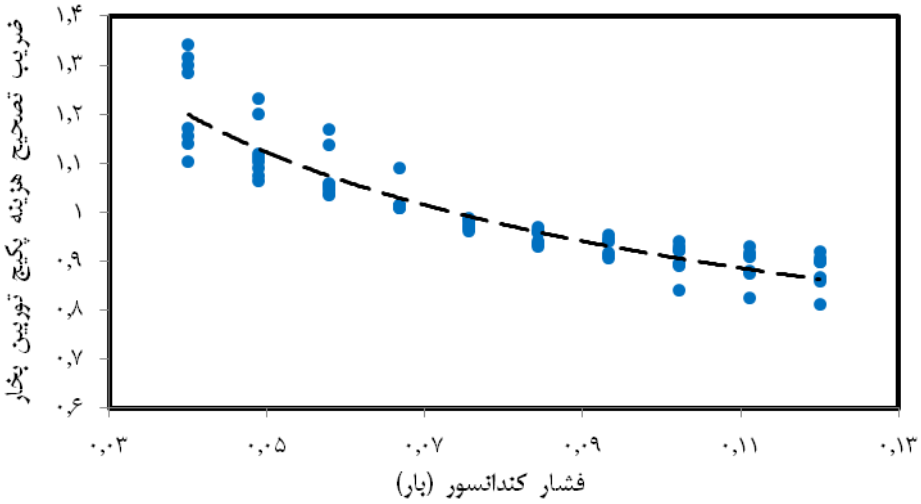
خنک کن نشان داده شده است که تأثیر کمتر ولی غیر قابل اجتنابی دارد.



شکل ۸. ضریب تصحیح دمای بخار اصلی برای قیمت هیترهای آب تغذیه و سیستم خنک‌کن

۴- تأثیر فشار کندانسور بر قیمت‌ها

فشار کندانسور به طور منطقی تأثیری بر تجهیزاتی همچون بویلر نمی‌باید داشته باشد. هیترهای آب تغذیه نیز از نظر قیمت تأثیرپذیری از فشار کندانسور ندارند ولی مجموعه توربین بخار و خود سیستم خنک‌کن وابستگی شدیدی به فشار کندانسور دارند. در شکل (۹) میزان تغییرات قیمت مجموعه توربین (توربین بخار و ژنراتور و سایر تجهیزات وابسته) با فشار طراحی کندانسور آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش فشار کندانسور، قیمت توربین بخار بصورت نمایی کاهش می‌یابد که انتظار آن نیز می‌رفت. چراکه دستیابی به فشارهای مطلق پایین در کندانسور معادل مدنظر قرار دادن مسائل متفاوتی در طراحی طبقات انتهایی توربین فشار ضعیف می‌باشد (منجمله بالا رفتن سرعت بخار و تلفات خروجی توربین).

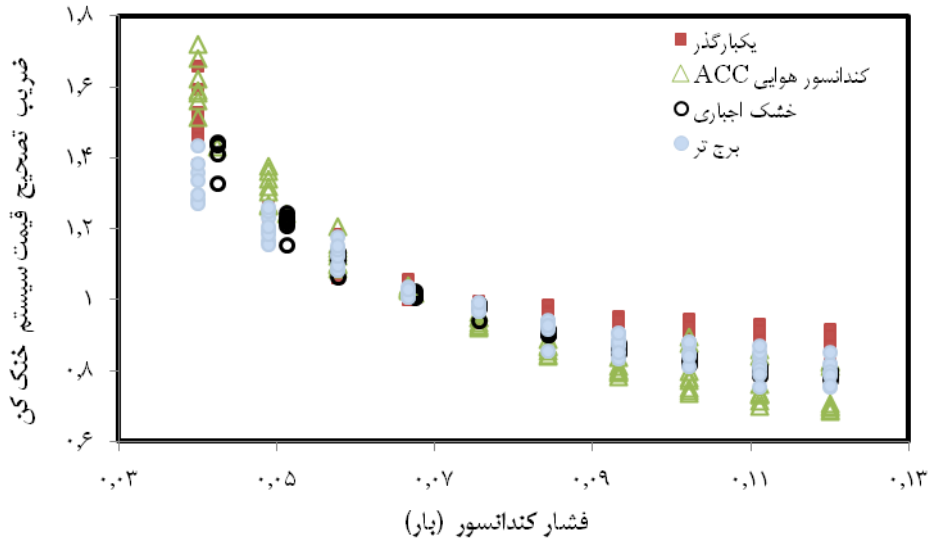


شکل ۹. ضریب تصحیح قیمت مجموعه توربین بخار بر حسب تغییرات فشار کندانسور

اما سیستم خنک‌کن مشخصاً بیشترین تأثیر را از فشار طراحی کندانسور خواهد داشت. این تأثیر تا حدی بستگی به نوع سیستم

www.SID.ir

خنک‌کن دارد. در این پژوهش، چهار نوع سیستم خنک‌کن مدنظر قرار گرفته اند که در قسمت ۵ بیشتر درباره آنها توضیح داده خواهد شد. در شکل (۱۰) نحوه تغییرات قیمت مجموعه سیستم‌خنک‌کن با فشار کندانسور نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که این شکل تنها نشان دهنده میزان حساسیت قیمت سیستم خنک‌کن به فشار کندانسور است و مقادیر مطلق قیمت هر سیستم در بخش بعدی ارائه خواهد شد. همانطور که مشخص است با کاهش فشار طراحی کندانسور، قیمت سیستم خنک‌کن به شدت افزایش می‌یابد. سیستم خنک‌کن یکبارگذر در فشارهای طراحی کندانسور بالا تقریباً تغییرات قیمت چندانی ندارد. بنابراین می‌توان گفت چون کاهش فشار طراحی کندانسور، قیمت سیستم خنک‌کن یکبارگذر را بطور جدی کاهش نمی‌دهد، از نظر اقتصادی بهتر است فشار کندانسور یکبارگذر بیشتر از ۰/۰۸ بار طراحی نشود.



شکل ۱۰. ضریب تصحیح فشار کندانسور بر قیمت سیستم خنک‌کن با توجه به نوع سیستم خنک‌کن در دمای محیط ثابت

قیمت سیستم‌های خشک و تر تقریباً بطور یکسانی نسبت به فشار طراحی کندانسور تغییر می‌نماید. کندانسورهای هواخنک (ACC) اما بیشترین حساسیت را به فشار طراحی کندانسور دارند. بدین ترتیب که با کاهش فشار طراحی کندانسور، قیمت آنها به شدت افزایش می‌یابد و با افزایش فشار، قیمتشان شدیداً کاهش می‌یابد. سیستم‌های خنک‌کن تر و خشک نیز هر دو برای فشار طراحی کندانسور پایین مناسب‌ترند چراکه قیمت آنها با کاهش فشار طراحی کندانسور به شدت کندانسورهای یکبارگذر یا کندانسورهای هواخنک افزایش نمی‌یابد. البته انتخاب نوع سیستم خنک‌کن فارغ از مسائل فنی به مطالب بخش بعدی نیز وابستگی زیادی دارد.

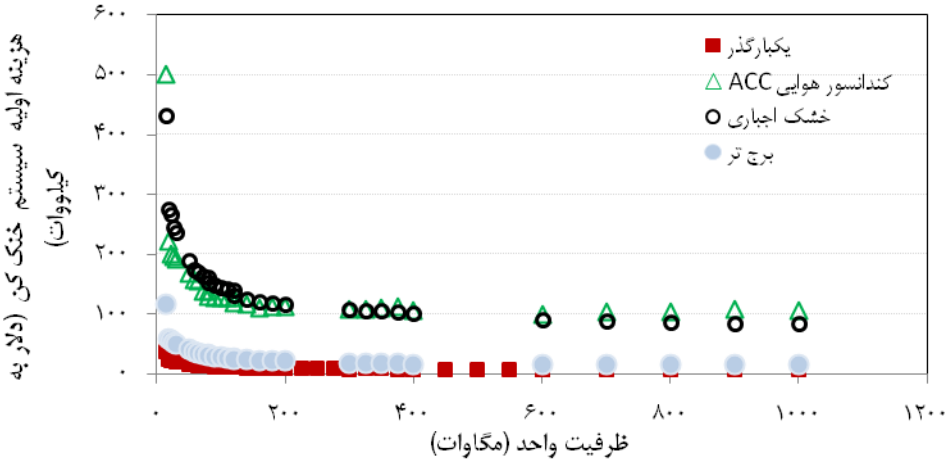
۵- تأثیر نوع سیستم خنک‌کن بر قیمت

همانطور که اشاره گردید، چهار سیستم خنک‌کن مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. کندانسورهای یکبارگذر که از آب دریا یا رودخانه برای خنک‌کردن سیستم استفاده می‌کنند از نظر قیمت به دو تجهیز اصلی کندانسور و پمپ‌های آب خنک‌کن (CWP) تقسیم می‌شوند. به عنوان نمونه‌ای از این کندانسورها در نیروگاه‌های کشور می‌توان به نیروگاه بندرعباس اشاره نمود. کندانسورهای هواخنک نیز که در سال‌های گذشته استقبال زیادی از آنها در ایران شده است نیز تنها همان سلول‌های دلتایی و فن‌هایشان از نظر قیمتی مدنظر قرار گرفته‌اند. برج‌های خنک‌کن تر که به ویژه در نیروگاه‌های قدیمی کشور بسیار دیده می‌شوند و امروزه به دلیل کم‌آبی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند نیز از نظر قیمتی به سه قسمت کندانسور، برج خنک‌کن، و پمپ آب

www.SID.ir

خنک‌کن تقسیم شدند. برج‌های خشک نیز به همین ترتیب مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفتند. لازم به یادآوری است که برج‌های خشک بررسی شده بصورت جریان اجباری می‌باشند و از فن برای خنک‌نمودن آب خنک‌کن خروجی از کندانسور که در مبدلهای برج جریان یافته است، استفاده می‌گردد. در واقع این برج‌های خشک متفاوت از برج‌های خشک جریان طبیعی می‌باشند که بعضاً بین نیروگاهیان کشور به برج‌های هلر شهرت یافته‌اند. لازم به ذکر است که بطور مثال هنگامی که از کندانسور هواخنک در نیروگاه استفاده شود، همانند شکل (۱) دیگر سیستم خنک‌کن ۲ تا ۳ درصد از هزینه تجهیزات واحد را به خود اختصاص نمی‌دهد بلکه این درصد به حدود ۲۵ الی ۳۰٪ خواهد رسید.

در شکل (۱۱) هزینه هر یک از این سیستم‌های خنک‌کن بر حسب kW ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش ظرفیت واحد، قیمت‌ها تقریباً ثابت می‌مانند. سیستم‌های ACC، خشک، مرطوب و یکبارگذر به ترتیب بیشترین قیمت‌ها را دارند و در ظرفیت‌های بالا قیمت آنها تقریباً در مقادیر ۱۱۰، ۹۰، ۱۷ و ۸ دلار برای هر کیلووات ثابت می‌ماند (قیمت‌های سال ۲۰۱۰). پایین بودن هزینه اولیه کندانسورهای یکبارگذر و سیستم‌ها مرطوب در این شکل به وضوح نمایان است. از دیگر نکات شکل (۱۱) اینکه در ظرفیت‌های پایین، بین سیستم خشک مکش اجباری و کندانسور هواخنک، سیستم ACC از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است. این ارجحیت در واحدهایی با ظرفیت بالا معکوس می‌گردد.



شکل ۱۱. قیمت سیستم خنک‌کن به ازای هر kW برای ظرفیت‌ها و سیستم‌های مختلف (سال ۲۰۱۰)

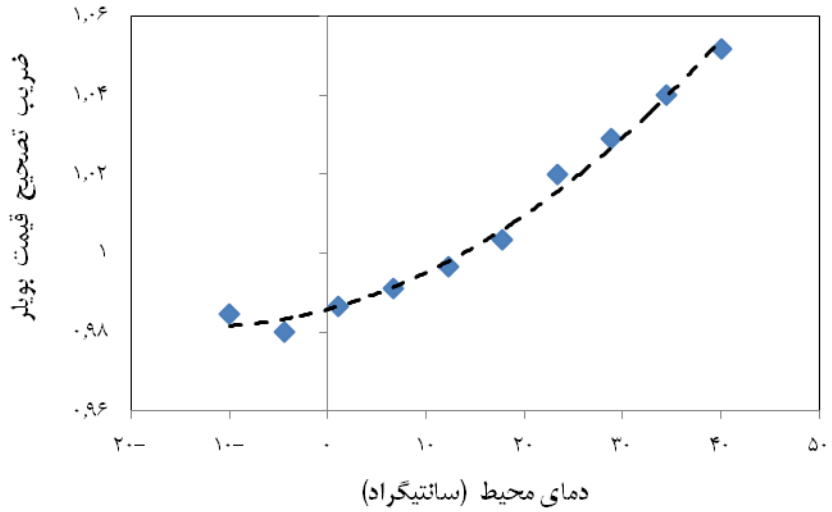
بر مبنای شکل‌های (۱۰) و (۱۱) میتوان ادعا نمود که در صورت دسترسی به آب خنک‌کنی مثل دریا یا رودخانه‌های بزرگ، با در نظر گرفتن پیامدهای زیست محیطی، استفاده از سیستم خنک‌کن یکبارگذر از نظر اقتصادی بدون رقیب است. البته سیستم‌های خنک‌کن تر نیز در فشار کندانسور بالا یا پایین، در صورت دسترسی به آب شیرین و آسیب نرساندن به منابع آبی از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه‌اند. اگرچه این شرایط در کشور تقریباً موجود نمی‌باشد، به ویژه برای ظرفیت‌های بالای نیروگاهی. سیستم خنک‌کن خشک مکش اجباری در ظرفیت‌های بالا و به ویژه هنگامی که فشار طراحی کندانسور پایین است، برتری محسوسی نسبت به کندانسورهای هوایی دارد. در ظرفیت‌های بالا و هنگامی که فشار طراحی کندانسور بالاست، یا در ظرفیت‌های پایین (حدوداً زیر ۱۰۰ مگاوات) و فشار طراحی کندانسور پایین، این دو سیستم خنک‌کن تقریباً سرمایه اولیه یکسانی را نیاز دارند. اما در ظرفیت‌های کمتر از ۲۵۰ مگاوات و به ویژه هنگامی که فشار طراحی کندانسور بیش از ۰/۰۸ بار است، سیستم خنک‌کن ACC مزیت بیشتر نسبت به سیستم خنک‌کن خشک مکش اجباری دارد.

www.SID.ir

۶- تأثیر دمای طراحی محیط بر قیمت‌ها

برای محاسبه قیمت‌های اولیه سیستم‌های خنک‌کن مختلف، شرایط آب و هوایی یکسانی در نظر گرفته شد. از نظر دمایی، دمای محیط (یا آب خنک‌کن) برابر ۱۵ درجه سانتیگراد و از نظر رطوبت نسبی نیز ۳۰٪ مدنظر قرار گرفت. با اینحال، فارغ از شرایط آب و هوایی، ابعاد سیستم‌های خنک‌کن با توجه به فشار کندانسور مورد نیاز بدست آمد. تغییرات دمای محیط به نوبه خود بر فشار طراحی کندانسور تأثرگذار خواهد بود. با اینحال، لازم به یادآوری است که شکل (۱۰) برای دمای محیط ثابت بدست آمده است. به عنوان مثال، وقتی فشار کندانسور طراحی برای یک سیستم خشک مکش اجباری افزایش می‌یابد، قیمت سیستم خنک‌کن کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). ولی این کاهش به شرطی است که دمای محیط تغییری نکند. اگر در حالیکه فشار طراحی کندانسور زیاد میشود، دمای محیط نیز افزایش یابد، مشخصاً قیمت اولیه سیستم خنک‌کن افزایش خواهد یافت. ضرایب تصحیح دمای محیط برای سیستم‌های خنک‌کننده در ادامه ارائه شده است. البته برای کندانسورهای یکبارگذر، به دلیل وابستگی آنها به دمای آب که از دمای محیط متفاوت است ولی با آن رابطه‌ای دارد، این وابستگی ارائه نشده است. البته بیشترین تأثیر دمای محیط بر سیستم‌های خنک‌کن خشک و تر در رابطه با برج خنک‌کن آنها می‌باشد و قیمت کندانسور یا پمپ آب خنک‌کن چندان تحت تأثیر دمای محیط قرار نمی‌گیرند.

یکی دیگر از تجهیزات اصلی که با تغییر دمای طراحی محیط، طراحی‌اش و در نتیجه قیمت اولیه‌اش تغییر می‌نماید، بویلر است. در این تجهیز اصلی با افزایش یا کاهش دمای محیط، زیرمجموعه‌هایی مانند فن‌ها و ژانگستروم (پیش‌گرمکن دورانی هوا) بیشتر تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. در شکل (۱۲) اثر دمای محیط بر قیمت بویلر نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. ضریب تصحیح قیمت بویلر با تغییرات دمای طراحی هوای محیط

۷- تأثیر سوخت مصرفی بر قیمت بویلر

مشخصاً سوخت مصرفی واحد تنها بر قیمت اولیه بویلر اثرگذار خواهد بود. در این مطالعه، چهار نوع سوخت مورد بررسی قرار گرفتند. تمامی ارقام مطرح شده در قسمت‌های قبلی بر مبنای سوخت گاز طبیعی ارائه گردیده است. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت مازوت موجب افزایش ۴۰ درصدی قیمت اولیه بویلر خواهد شد. هرچند زغال سنگ‌ها تنوع بسیاری دارند، ولی استفاده از سوخت زغال سنگ بطور میانگین موجب افزایش قیمت اولیه یک بویلر به میزان ۷۰٪ قیمت‌های شکل (۲) (برای گاز طبیعی) خواهد بود. به عنوان مثالی از سوخت‌های زیست‌توده یا بایومس نیز ضایعات چوب مدنظر قرار گرفت که در نتیجه قیمت بویلر آنها در شرایط مشابه ۱۳۰ درصد بیشتر از بویلری با سوخت گاز طبیعی بدست آمد (معادل ۲/۳ برابر).

www.SID.ir

۸- اصلاح قیمت‌ها برای سال‌هایی غیر از ۲۰۱۰

نمودارهای ارائه شده در قسمت‌های ۲ الی ۷ فارغ از قیمت هر تجهیز، اطلاعات خوبی در راستای مقایسه قیمت‌ها و اثرگذاری پارامترهای مختلف بر قیمت تجهیزات به نمایش در می‌آورند. با اینحال، آنچه در قسمت ۱ نشان داده شد (قیمت هر تجهیز به ازای هر کیلو وات ظرفیت واحد) نیز برای محاسبات اقتصادی نیروگاه‌های بخار حائز اهمیت است. لیکن این نمودارها همگی بر مبنای قیمت‌های سال ۲۰۱۰ حاصل شده‌اند و برای قابل استفاده شده نیاز به تعدیل قیمت‌های برای سال‌های دیگر دارند. در منابع مختلف، روابط یا جدولهایی برای مقایسه قیمت تجهیزات در سالهای غیر یکسان وجود دارد. بطور مثال در گزارشی از DOE/NETL که مربوط به سال ۲۰۰۲ و جهت تخمین قیمت تجهیزات فرآیندی است (Loh et al., 2002)، در جدولهای ۸ الی ۱۱ شاخصهای قیمت را برای سالهای ۱۹۱۳ الی ۲۰۰۱ ارائه کرده است. نکته‌ای که در این جداول وجود دارد، تغییر خطی شاخص قیمت با زمان است. چند مورد از اطلاعات قیمتی نرم‌افزار ترموفلو برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴، ۲۰۰۷ نیز با داده‌های ۲۰۱۰ مقایسه گردید و همین تغییرات خطی قیمت با زمان مشاهده شد. البته لوه و همکاران برای شاخص قیمت طی ۷ سال بین ۸ الی ۲۳ درصد افزایش نشان داده اند (در جداول مختلف) ولی در پایگاه داده‌های موجود در نرم‌افزار ترموفلو، قیمت تجهیزات طی ۷ سال حدود ۸۵٪ افزایش قیمت دلاری داشته است. با توجه به اینکه جداول لوه و همکاران برای تجهیزات فرآیندی می‌باشد و کل این مقاله بر پایه اطلاعات اقتصادی ترموفلو است، از رابطه استخراج شده از نسخه‌های مختلف این نرم‌افزار استفاده خواهد شد.

۹- روابط نهایی برای قیمت اولیه تجهیزات

در این بخش به تفکیک برای هر یک از تجهیزهای اصلی ارائه شده، رابطه‌ای ارائه خواهد شد. برای هر تجهیز ابتدا مشخص می‌گردد که قیمتش تابع چه پارامترهایی است و سپس قیمت آن به ازای هر kW ظرفیت واحد ارائه خواهد شد. قیمت‌ها ماحصل ضرب یک عبارت در چندین ضریب تصحیح هستند.

بویلر مادون بحرانی

$$Cost_{boiler} = function\,(Power, T_{SH}, P_{HP}, Fuel\ type, T_{amb}, Year)$$
$$Cost_{boiler} = F_{T.b} \,.\, F_{P.b} \,.\, F_f \,.\, F_{amb.b} \,.\, F_Y \,.\, (310\ Power^{-0.15})$$
$$F_{T.b} = 5.25 \times 10^{-8}\ {T_{SH}}^3 - 7.2 \times 10^{-5}\ {T_{SH}}^2 + 0.032\ T_{SH} - 3.63$$
$$F_{P.b} = (5 \times 10^{-6}\ Power + 3 \times 10^{-4}).\, P_{HP} + (1.1 - 1.3 \times 10^{-3}\ Power)$$
$$F_f = \begin{cases} 1 & fuel: natural\ gas \\ 1.4 & fuel: Heavy\ oil \\ 1.7 & fuel: Coal \\ 2.3 & fuel: biomass \end{cases}$$
$$F_{amb.b} = 3 \times 10^{-5}\ {T_{amb}}^2 + 0.0007\ T_{amb} + \ 0.98275$$

برای بویلر فوق بحرانی تنها تابع قیمت و ضریب تصحیح فشار بخار اصلی تغییر می‌کند:

$$Cost_{boiler} = F_{T.b} \,.\, {F_{P.b}}' \,.\, F_f \,.\, F_{amb.b} \,.\, F_Y \,.\, (530\ Power^{-0.2})$$
$${F_{P.b}}' = 1$$

مجموعه توربین بخار (توربین و ژنراتور)

$$Cost_{turbine} = function\,(Power, T_{SH}, P_{cond}, Year)$$
$$Cost_{turbine} = F_{T.t} \,.\, F_{cond.t} \,.\, F_Y \,.\, (1650\ Power^{-0.4})$$
$$F_{T.t} = 7.24 \times 10^{-6}\ {T_{SH}}^2 - 0.0066\ T_{SH} + \ 2.5$$
$$F_{cond.t} = 0.4567\ {P_{cond}}^{-0.3}$$

تجهیزات ولتاژ

www.SID.ir

$$Cost_{Voltage} = function\,(Power, Year)$$
$$Cost_{Voltage} = F_Y\,.\,(11\,Power^{0.2})$$

هیترهای آب تغذیه

$$Cost_{feedwater\ heatrs} = function\,(Power, T_{SH}, P_{HP}, Year)$$
$$Cost_{feedwater\ heaters} = F_{T.fwh}\,.F_{P.fwh}\,.F_Y\,.(15\,Power^{-0.06})$$
$$F_{T.fwh} = -6.1\times10^{-4}\,T_{SH} + 1.3$$
$$F_{P.fwh} = (3\times10^{-6}\,Power + 1.3\times10^{-3}).P_{HP} + (0.98 - 1.2\times10^{-3}\,Power)$$

سیستم خنک‌کن

$$Cost_{cooling} = function\,(Power, cooling\ type, P_{cond}, T_{amb}, T_{SH}, Year)$$
$$\begin{cases} Cost_{cooling} = F_{cond.c}\,.F_{amb.c}\,.F_{T.c}\,.F_Y\,.(7.2\,Power + 450)/Power & \boldsymbol{Oncethrough} \\ Cost_{cooling} = F_{cond.c}\,.F_{amb.c}\,.F_{T.c}\,.F_Y\,.(103\,Power + 3000)/Power & \boldsymbol{ACC} \\ Cost_{cooling} = F_{cond.c}\,.F_{amb.c}\,.F_{T.c}\,.F_Y\,.(80\,Power + 6000)/Power & \boldsymbol{Forced/Dry} \\ Cost_{cooling} = F_{cond.c}\,.F_{amb.c}\,.F_{T.c}\,.F_Y\,.(15\,Power + 1000)/Power & \boldsymbol{Wet} \end{cases}$$
$$\begin{cases} F_{cond.c} = 0.3\,P_{cond}^{-0.45} & \boldsymbol{Once-through} \\ F_{cond.c} = 0.16\,P_{cond}^{-0.7} & \boldsymbol{ACC} \\ F_{cond.c} = 0.24\,P_{cond}^{-0.55} & \boldsymbol{Forced/Dry} \\ F_{cond.c} = 0.28\,P_{cond}^{-0.5} & \boldsymbol{Wet} \end{cases}$$
$$F_{amb.c} = (1.1\times10^{-6}Power + 1.1\times10^{-4})\,T_{amb}{}^2 + (-7.5\times10^{-5}Power + 7.5\times10^{-4})\,T_{amb} + (9.8\times10^{-4}Power + 0.94)$$

البته ضریب تصحیح دمای طراحی محیط برای سیستم‌های خنک‌کن یکبارگذر که از آب دریا یا رودخانه بطور مستقیم استفاده می‌کنند قابل اعمال نیست.

$$F_{T.c} = -6.4\times10^{-4}\,T_{SH} + 1.3$$

ضریب تصحیح قیمت‌ها برای سال (FY) نیز برای تمامی تجهیزها بصورت تقریبی برابر است با:

$$F_Y = 0.0677\,Year - 135$$

در روابط بالا Year سال مدنظر به میلادی، TSH دمای طراحی بخار اصلی (حداکثر دمای بخار سیکل) در واحد سانتیگراد، PHP فشار طراحی بخار اصلی (حداکثر فشار بخار سیکل) در واحد بار، Tamb دمای طراحی هوای محیط در واحد سانتیگراد، Pcond فشار طراحی کندانسور در واحد بار، و Power ظرفیت نامی واحد در واحد مگاوات می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

به منظور یافتن روابطی مفید برای تخمین قیمت تجهیزات اصلی نیروگاه‌های بخار، از نرم‌افزار ترموفلو جهت مدلسازی و تخمین قیمت تجهیزات کمک گرفته شد. نرم‌افزار ترموفلو برای تخمین قیمت تجهیزات از داده‌های واقعی گردآوری شده از نیروگاه‌ها و شرکت‌های سازنده بهره‌برداری می‌نماید. به کمک این نرم‌افزار، سیکل‌های متنوعی مدلسازی شدند و در نهایت، حساسیت اطلاعات اقتصادی آنها نسبت به پارامترهای طراحی سیکل مورد مطالعه قرار گرفت. تجهیزات اصلی‌ای که قیمت آنها بررسی گردیدند عبارتند از بویلر، مجموعه توربین بخار (توربین و ژنراتور)، مجموعه هیترهای آب تغذیه، سیستم خنک‌کن (یکبارگذر، خشک اجباری، مرطوب، یا کندانسور هوا خنک)، و تجهیزات ولتاژ. این تجهیزات عمده قیمت تجهیزات یک نیروگاه بخار را شکل می‌دهند. لازم به ذکر است که برخی تجهیزات مانند پمپ‌های تغذیه بویلر و پمپ‌های آب خنک‌کن در داخل بویلر و سیستم خنک‌کن دیده شده‌اند. وابستگی قیمت اولیه هر یک از این تجهیزات به ظرفیت تولید نامی واحد، دمای طراحی بخار اصلی،

www.SID.ir

فشار طراحی بخار اصلی، فشار طراحی کندانسور، دمای طراحی محیط، نوع سوخت بویلر، و نوع سیستم خنک‌کن مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج نشان دادند که بویلر و توربین بخار برای یک نیروگاه ۶۰۰ مگاواتی، هر یک در حدود ۴۰٪ از سرمایه اولیه خرید تجهیزات اصلی را به خود اختصاص می‌دهند. با کاهش ظرفیت، سهم توربین بخار افزایش و سهم بویلر کاهش می‌یابد. البته این به این معنا نیست که قیمت بویلر (برای هر کیلووات ظرفیت نیروگاه) با کاهش ظرفیت، افزایش نمی‌یابد؛ بلکه میزان افزایش قیمت توربین بخار در ظرفیت‌های پایین آنقدر زیاد است که سهم بویلر را کمتر می‌نماید. بطور کلی با افزایش ظرفیت واحد، تمامی تجهیزات مکانیکی کاهش قیمت ($/kW) خواهند داشت و تنها تجهیزات ولتاژ هستند که رفتاری معکوس از خود نشان می‌دهند .

قیمت بویلر به پارامترهای بیشتری وابسته است به نحوی که متأثر از ظرفیت، دمای بخار، فشار بخار، دمای محیط، نوع سوخت مصرفی و مادون بحرانی یا فوق بحرانی بودن سیکل می‌باشد. قیمت مجموعه توربین بخار اما فقط به ظرفیت، دمای بخار و فشار کندانسور وابسته است. مجموعه هیترهای آب تغذیه نیز به ظرفیت، دمای بخار و فشار بخار اصلی بستگی دارند. هزینه سرمایه گذاری سیستم خنک‌کن علاوه بر نوع سیستم (خشک، تر، هواخنک و یکبارگذر) به دمای محیط، فشار کندانسور، فشار بخار اصلی و ظرفیت وابسته است. تجهیزات ولتاژ نیز تنها به ظرفیت وابستگی داشته‌اند. در قسمت انتهایی مقاله، روابطی که برای تخمین قیمت اولیه هر از تجهیزات اصلی لازم می‌باشد ارائه گردیده است.

بسیاری از نتایج و نمودارها قابل انتظار بوده‌اند. به عنوان نمونه، افزایش قیمت بویلر با افزایش فشار بخار هرچند رفتاری ساده ندارد ولی قابل پیش‌بینی بود. ولی برخی موارد قابل تأمل‌تر می‌باشند. افزایش قیمت تجهیزات ولتاژ با ظرفیت از این موارد است. مورد دیگر، حداقل شدن هزینه سرمایه‌گذاری بویلر در محدوده ۵۰۰ الی ۵۴۰ سانتیگراد برای دمای بخار اصلی می‌باشد. در واقع، قیمت بویلر در دماهای بخار خارج از این محدوده بیشتر خواهد بود. قیمت تجهیزات خنک‌کن نیز وابستگی زیادی به نوع سیستم دارد. بطور کلی سیستم‌های هواخنک و خشک اجباری (دارای برج‌های فن‌دار) قیمتشان ۹ تا۱۴ برابر سیستم‌های یکبارگذر است. سیستم‌های مرطوب هم در حدود ۲ تا ۲/۵ برابر سیستم‌های یکبارگذر هزینه اولیه نیاز دارند. در مقایسه دو سیستم هواخنک و خشک اجباری، سیستم خنک‌کن دوم زمانی که ظرفیت واحد بیشتر از ۲۵۰ مگاوات بوده و فشار طراحی کندانسور نیز کمتر از ۰/۰۸ بار باشد مزیت اقتصادی بیشتری (از نظر سرمایه اولیه) نسبت به ACC دارد.

منابع

آژانس جهانی انرژی (https://www.iea.org/statistics/electricity)

شرکت مادر تخصصی توانیر (۱۳۹۶). ***آمار تفصیلی صنعت برق ایران: تولید نیروی برق در سال ۱۳۹۶***.

کاظمی عالیه، شکوری گنجوی حامد، رئوفی زینب، حسین‌زاده مهناز، شکیبا شیوا (۱۳۹۲)، **"مروری بر مطالعات مدلسازی عرضه انرژی و انتخاب بهترین تحقیقات انجام‌شده در ایران با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی"**، فصلنامه پژوهش های سیاست گذاری وبرنامه ریزی انرژی، ۱ (۲) :۲۸-۵

مشیری سعید، مروت حبیب، نصیری عباس (۱۳۹۷)."**بررسی تأثیر افزایش قیمت سوخت بر قیمت برق با استفاده از مدل‌سازی عامل بنیان بازار برق**". فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی. ۱۴ (۵۶) :۳۴-۱

مهرپناهی عبدالله، حسینعلی پور سید مصطفی، سیجانیوندی سوران (۱۳۹۲)، **"بهینه‌سازی چند هدفه بازتوانی به روش گرمایش آب تغذیه موازی یک نیروگاه بخار بوسیله الگوریتم ژنتیک"**، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، سال ۴۵، شماره ۱، ص ۹۳ الی ۱۰۸

www.SID.ir

Baghsheikhi, M., & Sayyaadi, H. (2016). "**Real-time exergoeconomic optimization of a steam power plant using a soft computing-fuzzy inference system**", Energy, 114, 868-884.

Escosa, J. M., & Romeo, L. M. (2009). "**Optimizing CO_2 avoided cost by means of repowering**", Applied energy, 86(11), 2351-2358.

Lemmens, S. (2016). "**Cost engineering techniques and their applicability for cost estimation of organic Rankine cycle systems**", Energies, 9(7), 485.

Loh, H.P., Lyons, J., & White, C.W. (2002). "**Process equipment cost estimation. DOE/NETL**", National Energy Technology Center.

Mabrouk, A. N. A., Nafey, A. S., & Fath, H. E. (2010). "**Steam, electricity and water costs evaluation of power desalination co-generation plants**", Desalination and Water Treatment, 22(1-3), 56-64.

Romeo, L. M., Bolea, I., Lara, Y., & Escosa, J. M. (2009)."**Optimization of intercooling compression in CO2 capture systems**", Applied Thermal Engineering, 29(8-9), 1744-1751.

Rosen, M. A., & Dincer, I. (2003). "**Exergoeconomic analysis of power plants operating on various fuels**", Applied Thermal Engineering, 23(6), 643-658.

Olsommer, B. (1998). "**Méthode d'optimisation thermoéconomique appliquée aux centrales d'incinération d'ordures à cogénération avec appoint énergétique**" (No. THESIS_LIB). EPFL.

Söylemez, M. S. (2011). "**On the thermo economical optimization of feed water heaters in thermal power plants**", Smart Grid and Renewable Energy, 2(04), 410.

Ulrich, G. D., & Vasudevan, P. T. (2006). "**How to estimate utility costs: utility estimates are often complicated because they depend on both inflation and energy costs. This simplified approach offers a two-factor utility-cost equation and the relevant coefficients for a number of utilities**", Chemical Engineering, 113(4), 66-70.

Xiong, J., Zhao, H., Zhang, C., Zheng, C., & Luh, P. B. (2012). "**Thermoeconomic operation optimization of a coal-fired power plant**", Energy, 42(1), 486-496.

Zhai, H., & Rubin, E. S. (2010). "**Performance and cost of wet and dry cooling systems for pulverized coal power plants with and without carbon capture and storage**", Energy Policy, 38(10), 5653-5660.

www.SID.ir