مقاله

روش‌های افزایش بازده توربین‌های گازی

امیرمسعود میرحسینی، دکتری مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات
a.m.mirhosseini@gmail.com

الهام طهماسبی، دکتری مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات
etahmasebi77@yahoo.com

روح‌الله اسپنانی، سازمان توسعهٔ برق ایران
r_spanani@gmail.com

چکیده

توربین گازی ماشینی است که مستقیماً با هوای محیط پیرامون کار می‌کند. لذا هر عاملی که سبب تغییر شرایط هوای ورودی آن شود، بر بازدهٔ توربین اثر می‌گذارد. رطوبت نسبی، ارتفاع از سطح دریا و درجه حرارت محیط از دیگر عوامل تأثیرگذار بر بازده توربین گازی هستند. عموماً، فصول گرم سال، زمان اوج تقاضا برای انرژی الکتریکی است؛ این در حالی است که در چنین فصلی، توان خروجی توربین‌های گازی به‌دلیل درجه حرارت بالای هوای ورودی، به کمترین مقدار خود می‌رسد. همین امر نیز سبب می‌شود تا فشار زیادی بر صنعت نیروگاهی کشور وارد و جهت جبران تقاضای مازاد، همواره نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر برای احداث نیروگاه‌های جدیدتر احساس شود. در این مقاله توربین گازی V94.2، ساخت شرکت زیمنس[۱]، به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب و جهت مطالعات پایلوت از نرم‌افزار ترمو فلو[۲] و جی. تی. پرو[۳] استفاده شده است.

واژگان کلیدی: توربین گازی، هوای ورودی به کمپرسور، سرمایش تبخیری[۴]، مه‌پاشی[۵]، تبرید تراکمی[۶]، تبرید جذبی[۷]، بازده

مقدمه

از جمله عوامل مؤثر بر توان خروجی و بازده توربین‌های گازی عبارت است از درجه حرارت هوای محیط، رطوبت نسبی، ارتفاع از سطح دریا، فشار هوای ورودی و نوع سوخت مصرفی. بنابر نتایج ارائه‌شده، در این بین، دمای هوای ورودی و ارتفاع محل نصب از سطح دریا بیشترین تأثیر بر پارامترهای عملکردی توربین را دارند؛ البته اثر ارتفاع قابل حذف نیست، لذا تمامی روش‌های افزایش توان خروجی و بهبود بازده بر خنک‌کاری هوای ورودی متمرکز شده است [۱-۲]. در مقایسه با هزینهٔ احداث نیروگاه‌های جدید، اعمال روش‌های خنک‌کاری هوای ورودی روش کم‌هزینه‌تری است که سبب می‌شود توان خروجی

توربین‌های گازی به حد توان نامی نزدیک و بخش قابل توجهی از تقاضای مازاد جبران شود. خنک‌کردن هوای ورودی به کمپرسور - چون فرایندی مستقل است – بیشتر در توربین‌های گازی در حال بهره‌برداری مورد توجه قرار می‌گیرد [۳]. این روش بدون هیچ‌گونه تغییر یا اصلاحی در اجزای اصلی توربین گازی و با رعایت برخی نکات فنی قابل اجراست. محل نصب تجهیزات مربوط به آن تقریباً مستقل و جدا از اجزای اصلی سیکل توربین گاز است. با این‌حال، این روش‌های خنک‌کاری هوای ورودی در توربین‌های گازی در حال طراحی، تولید و یا نصب نیز قابل اجراست [۴].

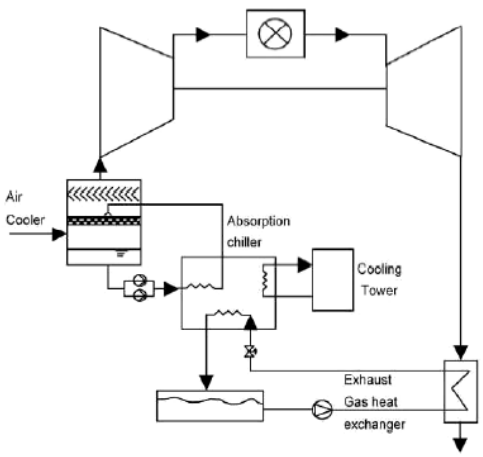
انواع روش‌های افزایش توان و بهبود بازده توربین‌های گازی عمدتاً به سه دستهٔ کلی زیر تقسیم می‌شوند [۵]:

۱. روش‌های افزایش توان با استفاده از خنک‌کاری هوای ورودی
۲. روش‌های بهبود بازده و افزایش توان براساس استفاده از گازهای گرم خروجی
۳. روش‌های ذخیره‌سازی انرژی

روش‌های دوم و سوم، به‌غیر از استفاده از گازهای گرم خروجی در سردسازهای جذبی برای خنک‌کاری هوای ورودی، همگی نیازمند ایجاد تغییرات در سیکل احتراق توربین هستند که انجام آن نیازمند در اختیار داشتن پارامترهای طراحی توربین و شرایط ترمودینامیکی آن است. لذا اعمال این روش‌ها تنها توسط سازندگان توربین‌های گازی و یا شرکت‌هایی امکان‌پذیر است که به شرایط طراحی توربین مورد نظر دسترسی داشته باشند. از این‌رو، با توجه به این محدودیت، به بررسی و تعیین پیش‌شرط‌های روش‌های افزایش توان با استفاده از خنک‌کاری هوای ورودی می‌پردازیم.

لازم به‌ذکر است که برای تعیین روش بهینه برای هر نیروگاه، باید با استفاده از معیارهای فنی و اقتصادی و تعیین امتیاز نهایی اقدام کرد؛ زیرا نمی‌توان تنها با در نظر گرفتن برتری‌های فنی یک روش و یا هزینهٔ کمتر روش دیگر، در این‌باره اظهار نظر نمود [۶]. لذا با توجه به مزایای روش‌های خنک‌سازی هوای ورودی، در این فاز به بررسی فنی و اقتصادی روش‌های تبخیری، تبرید تراکمی، تبرید جذبی و روش ایجاد مه در افزایش بازده توربین گازی V94.2 با استفاده از نرم‌افزار ترمو فلو و جی. تی. پرو پرداخته‌ایم.

در روش‌های تبخیری، آب در کانال هوای ورودی به کمپرسور تبخیر می‌شود. بدین ترتیب گرمای نهان تبخیر آب از هوا گرفته و هوا خنک می‌شود. محدودیت اساسی این روش، کاهش دمای ورودی، حداکثر تا دمای نقطهٔ اشباع بخار یا نقطهٔ شبنم است و مزیت آن، هزینهٔ اولیه و عملیاتی کمتر می‌باشد (شکل ۱).



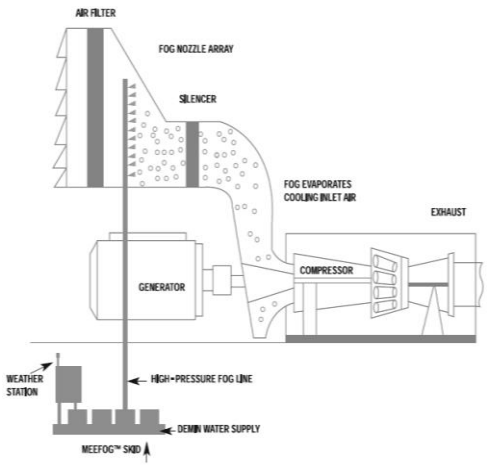
شکل ۱. نمایی شماتیک از نحوهٔ استفاده از روش تبخیری

در روش تبرید تراکمی، از یک سردساز ضربه‌ای یا شعاعی بهره گرفته می‌شود تا به‌وسیلهٔ یک کویل خنک‌کن یا با قراردادن تبخیرگر در مسیر هوا، هوای ورودی به کمپرسور خنک شود. هزینهٔ اولیه، مخصوصاً هزینهٔ عملیاتی زیاد و مصرف بالای انرژی از معایب این روش است و عدم وابستگی به شرایط محیطی از جمله مزایای آن می‌باشد.

در روش تبرید جذبی، از یک سردساز جذبی با سیال مبرد برای خنک‌کردن هوای ورودی به کمپرسور استفاده می‌شود. از معایب اساسی این روش می‌توان به هزینهٔ اولیهٔ بالا اشاره کرد. هزینهٔ عملیاتی کم، مصرف انرژی کمتر و

عدم وابستگی به شرایط محیطی از جمله مزایای این روش است.

در روش مه‌پاشی فشاربالا در کانال هوای ورودی، ذرات آب به درون کانال هوای ورودی پاشیده می‌شوند. این ذرات، با جذب گرمای هوا، تبخیر و سبب خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور می‌شوند. از طرف دیگر، با اضافه‌شدن آب به هوا، چگالی جریان افزایش می‌یابد که خود سبب افزایش توان خروجی خواهد شد [۷]. لازم به‌ذکر است روش پاشش فوق‌اشباع[۸] برای این نوع توربین، توسط نرم‌افزار توصیه نمی‌شود (شکل۲).



شکل ۲. نمایی شماتیک از سیستم مه‌پاشی

جهت تحلیل روش‌های افزایش بازده توسط نرم‌افزار ترمو فلو سه روش تبخیری، مه‌پاشی و تبرید تراکمی و جذبی انتخاب شده است. همچنین جهت مقایسهٔ بهتر روش‌های افزایش بازده و تأثیر عوامل محیطی بر خروجی توربین، دو سایت سنندج و خرمشهر، که هم‌اکنون توربین گازی V94.2 در آنها نصب است، انتخاب شده است. همچنین جهت تحلیل بهتر نتایج، شرایط اعمالی سیستم‌های افزایش بازده برای هر دو سایت یکسان در نظر گرفته شده است.

شرح تحقیقات

همان‌طورکه قبلاً بیان شد، جهت مقایسهٔ بهتر روش‌های افزایش بازده و تأثیر عوامل محیطی بر خروجی توربین دو سایت سنندج و خرمشهر که هم‌اکنون توربین V94.2 در آنها نصب می‌باشد انتخاب شده است.

روش‌های افزایش بازده در نیروگاه سنندج

الف: روش خنک‌کاری تبخیری

جهت اعمال روش خنک‌کاری تبخیری توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی از یک سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دمای و افزایش ۴۳ درصدی رطوبت، که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، استفاده شد.

ب: روش ایجاد مه (مه‌پاشی)

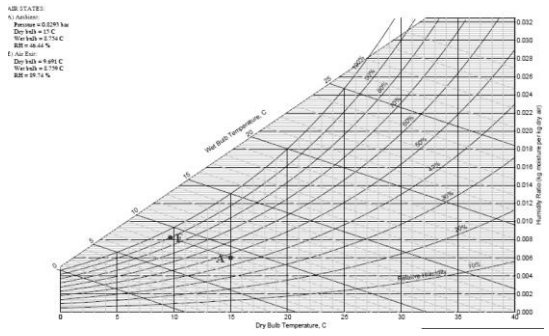
جهت اعمال روش ایجاد مه توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی از یک سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۴۳ درصدی رطوبت، که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، استفاده شد.

ج: روش تبرید تراکمی

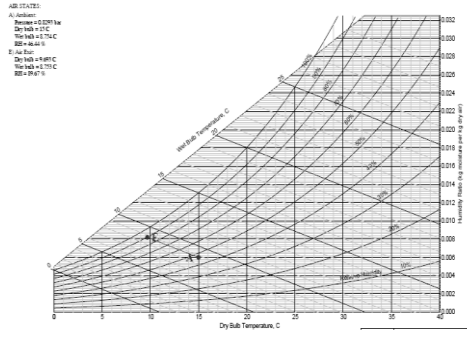
جهت اعمال روش تبرید تراکمی در دو حالت سردساز الکتریکی هواخنک[۹] و سردساز الکتریکی آب‌خنک[۱۰] توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی از دو سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۱۸ درصدی رطوبت، که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، استفاده شد. در شکل دبی و دمای آب ورودی و خروجی از سیستم و همچنین مشخصات پمپ‌ها آمده است.

د: روش تبرید جذبی

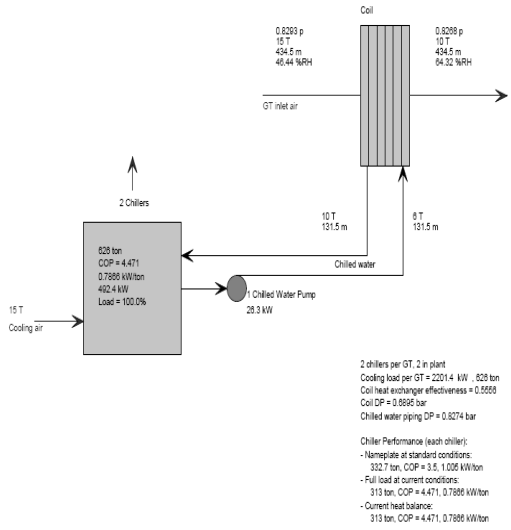
جهت اعمال روش تبرید جذبی در دو حالت سردساز جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای[۱۱] و سردساز جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای[۱۲]، توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی از دو سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۱۸ درصدی رطوبت، که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، استفاده شد. در این در شکل دبی و دمای آب ورودی و خروجی از سیستم و همچنین مشخصات پمپ‌ها آمده است.



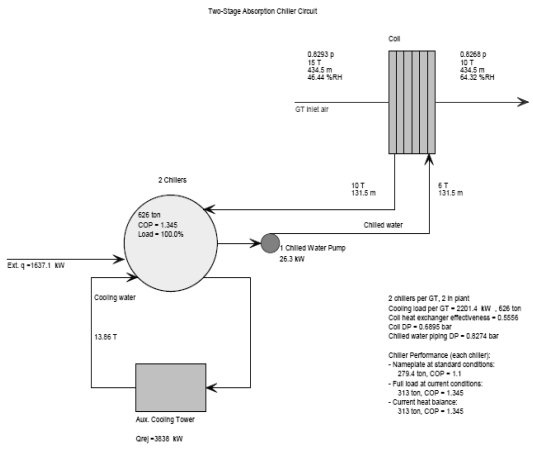
شکل ۳. مشخصات اعمال سیستم تبخیری



شکل ۴. مشخصات روش مه‌پاشی



شکل ۵. مشخصات سیستم تبرید تراکمی هواخنک



شکل ۶. مشخصات سیستم تبرید جذبی دومرحله‌ای

روش‌های افزایش بازده در نیروگاه خرمشهر

الف: روش خنک‌کاری تبخیری

جهت اعمال روش خنک‌کاری تبخیری توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی از یک سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۳۲ درصدی رطوبت، که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، استفاده شد.

ب: روش ایجاد مه (مه‌پاشی)

جهت اعمال روش ایجاد مه توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی نیز از یک سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۳۲ درصدی رطوبت، که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، استفاده شد.

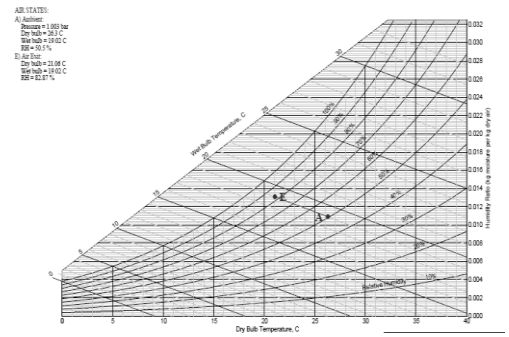
ج: روش تبرید تراکمی

جهت اعمال روش تبرید تراکمی در دو حالت سردساز الکتریکی هواخنک و آب‌خنک به‌کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی از دو سیستم با مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۱۸ درصدی رطوبت، که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، استفاده شد. در این شکل دبی و دمای آب ورودی و خروجی از سیستم و همچنین مشخصات پمپ‌ها آمده است.

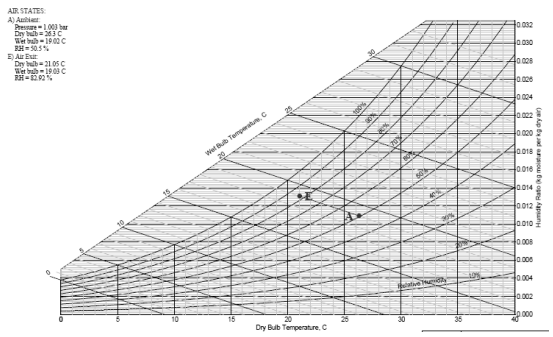
د: روش تبرید جذبی

جهت اعمال روش تبرید جذبی در دو حالت سردساز جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای[۱۳] و سردساز جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای[۱۴] توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی از دو سیستم با

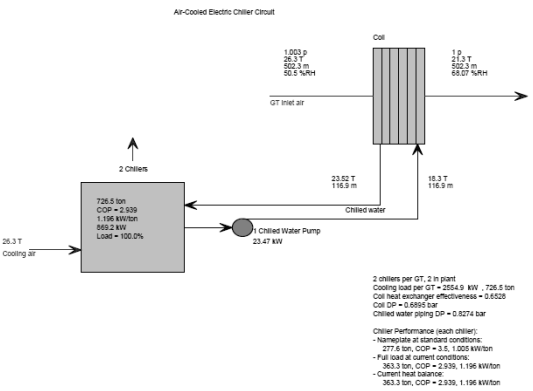
مشخصات کاهش ۵ درجه‌ای دما و افزایش ۱۸ درصدی رطوبت، که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، استفاده شد. در این شکل دبی و دمای آب ورودی و خروجی از سیستم و همچنین مشخصات پمپ‌ها آمده است.



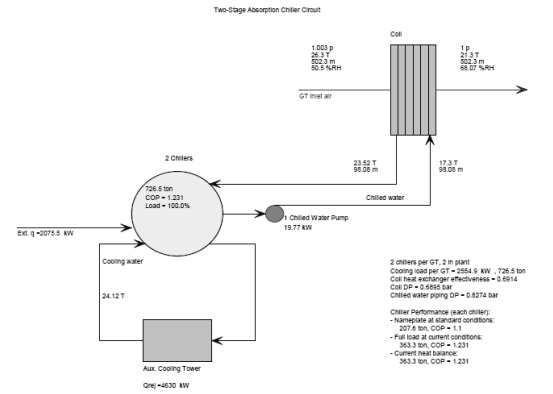
شکل ۷. مشخصات اعمال سیستم تبخیری



شکل ۸. مشخصات روش پاشش مه



شکل ۹. مشخصات سیستم تبرید تراکمی هواخنک



شکل ۱۰. مشخصات سیستم تبرید جذبی دومرحله‌ای

تحلیل روش‌های افزایش بازده توربین پایلوت با استفاده از نرم‌افزار

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، سه روش تبخیری، مه‌پاشی و تبرید تراکمی و جذبی جهت تحلیل روش‌های افزایش بازده توسط این نرم‌افزار انتخاب شد. همچنین برای مقایسهٔ بهتر روش‌های افزایش بازده و تأثیر عوامل محیطی بر خروجی توربین دو سایت نیروگاهی سنندج و خرمشهر انتخاب شد. در ادامه به ارائه و تحلیل روش‌ها می‌پردازیم.

حالت پایه

در ابتدا با توجه به شرایط محیطی سایت نیروگاه سنندج، توسط نرم‌افزار، شبیه‌سازی صورت گرفت (شکل ۱۱). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۶/۴۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۲۶/۸ کیلوگرم بود.

استفاده از روش خنک‌کاری تبخیری

در مرحلهٔ بعد، از روش خنک‌کاری تبخیری استفاده و شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۱۲). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۹/۶۹ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۹/۷۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۳۵/۸ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۳۴/۹ مگاوات، بازده ۳۴/۳۳ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت

نسبی ۴۶/۴۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۲۶/۸ کیلوگرم، توان ۵ مگاوات، بازده ۰/۲۵ درصد، رطوبت نسبی ۴۳/۳ درصد، دبی هوای ورودی ۹ کیلوگرم افزایش و دمای ورودی به کمپرسور ۵/۳۱ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

استفاده از روش مه‌پاشی

در مرحلهٔ بعد، از روش مه‌پاشی استفاده و شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۱۳). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۹/۶۹ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۹/۷۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۳۵/۸ کیلوگرم می‌باشد و نسبت به حالت پایه با توان ۱۳۴/۹ مگاوات، بازده ۳۴/۳۳ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۶/۴۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۲۶/۸ کیلوگرم، برای هر دو حالت قابل بررسی توان ۴/۲ مگاوات، بازده ۰/۲۲ درصد، رطوبت نسبی ۱۷/۸۸ درصد، دبی هوای ورودی تغییری نمی‌کند و دمای ورودی به کمپرسور ۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که نتایجی مشابه نتایج روش تبخیری حاصل شده است.

استفاده از روش تبرید تراکمی

در مرحلهٔ بعد، از روش تبرید تراکمی استفاده و در دو حالت سردساز الکتریکی هواخنک و سردساز الکتریکی آب‌خنک شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۱۴). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۴/۳۲ درصد و دبی هوای ورودی ۴۳۴/۵ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۳۴/۹ مگاوات، بازده ۳۴/۳۳ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۶/۴۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۲۶/۸ کیلوگرم، برای هر دو حالت مورد بررسی توان ۴/۲ مگاوات، بازده ۰/۲۲ درصد، رطوبت نسبی ۱۷/۸۸ درصد، دبی هوای ورودی تغییری نمی‌کند و دمای ورودی به کمپرسور ۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

استفاده از روش تبرید جذبی

در مرحله بعد، از روش تبرید جذبی استفاده و در دو حالت سردساز جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای و همچنین سردساز جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای، شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار، انجام شده است (شکل ۱۵). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۸ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷۳/۶۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۳۸/۱ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۳۴/۹ مگاوات، بازده ۳۴/۳۳ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۶/۴۴ درصد و دبی هوای ورودی ۴۲۶/۸ کیلوگرم، برای هر دو حالت قابل بررسی توان ۴/۲ مگاوات، بازده ۰/۲۲ درصد، رطوبت نسبی ۱۷/۸۸ درصد، دبی هوای ورودی تغییری نمی‌کند و دمای ورودی به کمپرسور ۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد که شرایطی مشابه با روش تبرید تراکمی به‌دست آمده است.

تحلیل این روش‌ها در نیروگاه خرمشهر

حالت پایه

در ابتدا با توجه به شرایط محیطی سایت نیروگاه خرمشهر، شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار صورت گرفت (شکل ۱۶). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۲۶/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۰/۵ درصد و دبی هوای ورودی ۴۹۵/۱ کیلوگرم می‌باشد.

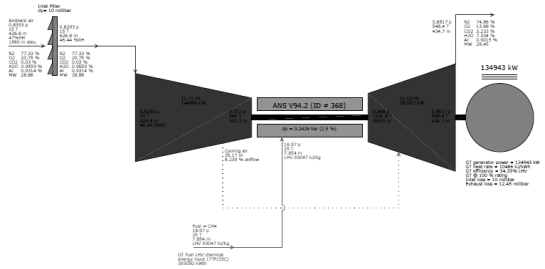
استفاده از خنک‌کاری تبخیری

در مرحلهٔ بعد، از روش خنک‌کاری تبخیری استفاده و شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۱۷). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۲۱/۱ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۲/۹ درصد و دبی هوای ورودی ۵۰۳/۳ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۵۲/۳ مگاوات، بازده ۳۳/۸ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۲۶/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۰/۵ درصد و دبی هوای ورودی ۴۹۵/۱ کیلوگرم، توان ۵/۱

مگاوات، بازده ۰/۳ درصد، رطوبت نسبی ۳۲/۴ درصد، دبی هوای ورودی ۸/۲ کیلوگرم افزایش و دمای ورودی به کمپرسور ۵/۲ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

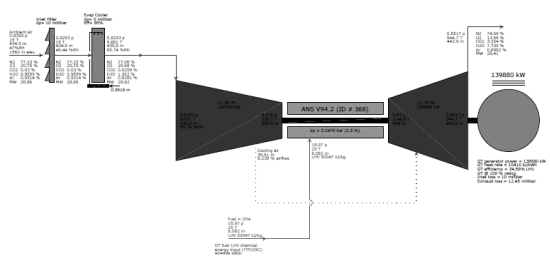
استفاده از روش مه‌پاشی

در مرحلهٔ بعد، از روش مه‌پاشی استفاده و شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۱۸).



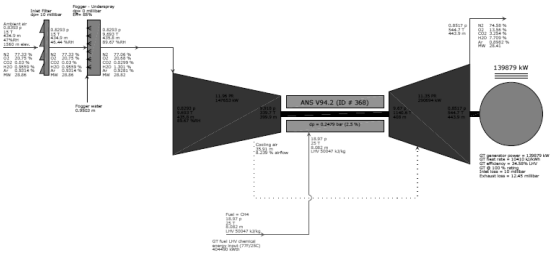
Gross Power = 134943 kW, Aux. & Transformer losses = 1601.6 kW, Net Power Output = 133341 kW
Gross Heat Rate = 10486 kJ/kWh, Net Heat Rate = 10612 kJ/kWh (LHV)
Gross Elec Eff = 34.33 %, Net Elec Eff = 33.92 %, PURPA Eff = 33.92 %, CHP (Total) Eff = 33.92 % (LHV)
Fuel LHV chemical energy input = 393050 kW

شکل ۱۱. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه سنندج در حالت پایه



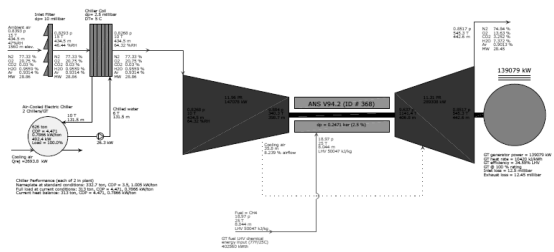
Gross Power = 139880 kW, Aux. & Transformer losses = 1660.7 kW, Net Power Output = 138220 kW
Gross Heat Rate = 10410 kJ/kWh, Net Heat Rate = 10535 kJ/kWh (LHV)
Gross Elec Eff = 34.58 %, Net Elec Eff = 34.17 %, PURPA Eff = 34.17 %, CHP (Total) Eff = 34.17 % (LHV)
Fuel LHV chemical energy input = 404494 kW

شکل ۱۲. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه سنندج
با استفاده از روش خنک‌کاری تبخیری



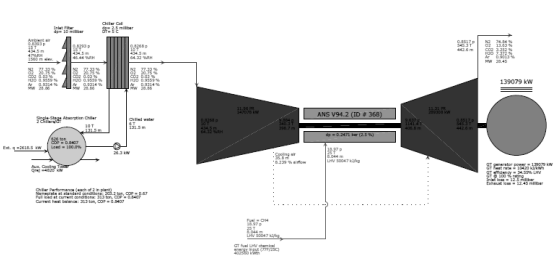
Gross Power = 139879 kW, Aux. & Transformer losses = 1678.2 kW, Net Power Output = 138201 kW
Gross Heat Rate = 10410 kJ/kWh, Net Heat Rate = 10537 kJ/kWh (LHV)
Gross Elec Eff = 34.58 %, Net Elec Eff = 34.17 %, PURPA Eff = 34.17 %, CHP (Total) Eff = 34.17 % (LHV)
Fuel LHV chemical energy input = 404490 kW

شکل ۱۳. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه سنندج
با استفاده از روش مه‌پاشی



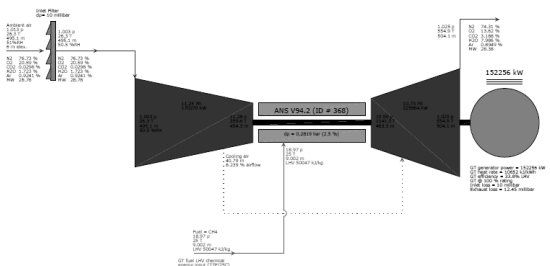
Gross Power = 139079 kW, Aux. & Transformer losses = 2143.1 kW, Net Power Output = 136936 kW
Gross Heat Rate = 10420 kJ/kWh, Net Heat Rate = 10583 kJ/kWh (LHV)
Gross Elec Eff = 34.55 %, Net Elec Eff = 34.02 %, PURPA Eff = 34.02 %, CHP (Total) Eff = 34.02 % (LHV)
Fuel LHV chemical energy input = 402560 kW

شکل ۱۴. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه سنندج
با استفاده از روش تبرید تراکمی هواخنک



Gross Power = 139079 kW, Aux. & Transformer losses = 1744.6 kW, Net Power Output = 137335 kW
Gross Heat Rate = 10420 kJ/kWh, Net Heat Rate = 10552 kJ/kWh (LHV)
Gross Elec Eff = 34.55 %, Net Elec Eff = 34.12 %, PURPA Eff = 33.79 %, CHP (Total) Eff = 33.46 % (LHV)
Fuel LHV chemical energy input = 402560 kW

شکل ۱۵. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه سنندج
با استفاده از روش تبرید جذبی دومرحله‌ای



Gross Power = 152256 kW, Aux. & Transformer losses = 1698.8 kW, Net Power Output = 150557 kW
Gross Heat Rate = 10652 kJ/kWh, Net Heat Rate = 10773 kJ/kWh (LHV)
Gross Elec Eff = 33.8 %, Net Elec Eff = 33.42 %, PURPA Eff = 33.42 %, CHP (Total) Eff = 33.42 % (LHV)
Fuel LHV chemical energy input = 450523 kW

شکل ۱۶. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه خرمشهر در حالت پایه

در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۲۱/۱ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۲/۹ درصد و دبی هوای ورودی ۵۰۳/۳ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۵۲/۳ مگاوات، بازده ۳۳/۸ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۲۶/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۰/۵ درصد و دبی هوای ورودی ۴۹۵/۱ کیلوگرم، توان ۵/۱ مگاوات، بازده ۰/۳ درصد، رطوبت نسبی ۳۲/۴ درصد، دبی هوای ورودی ۸/۲ کیلوگرم افزایش و دمای ورودی به کمپرسور ۵/۲ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

استفاده از روش تبرید تراکمی

در مرحلهٔ بعد، از روش تبرید تراکمی استفاده و در دو حالت سردساز الکتریکی هواخنک آب‌خنک، شبیه‌سازی به‌کمک نرم افزار انجام شده است (شکل ۱۹). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۲۱/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۷/۰۷ درصد و دبی هوای ورودی ۵۰۲/۳ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۵۲/۳ مگاوات، بازده ۳۳/۸ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۲۶/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۰/۵ درصد و دبی هوای ورودی ۴۹۵/۱ کیلوگرم، در هر دو حالت بررسی‌شده توان ۴/۳ مگاوات، بازده ۰/۲۳ درصد، رطوبت نسبی ۱۷/۵۷ درصد، دبی هوای ورودی ۷/۲ کیلوگرم افزایش و دمای ورودی به کمپرسور ۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

استفاده از روش تبرید جذبی

در مرحلهٔ بعد، از روش تبرید جذبی استفاده و در دو حالت سردساز جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای و سردساز جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای، شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۲۰). در این حالت دمای ورودی به کمپرسور ۲۱/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۸/۰۷ درصد و دبی هوای ورودی ۵۰۲/۳ کیلوگرم می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت پایه با توان ۱۵۲/۳ مگاوات، بازده ۳۳/۸ درصد، دمای ورودی به کمپرسور ۲۶/۳ درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۰/۵ درصد و دبی هوای ورودی ۴۹۵/۱ کیلوگرم، در هر دو حالت بررسی‌شده توان ۴/۳ مگاوات، بازده ۰/۲۳ درصد، رطوبت نسبی ۱۷/۵۷ درصد، دبی هوای ورودی ۷/۲ کیلوگرم افزایش و دمای ورودی به کمپرسور ۵ درجهٔ سانتی‌گراد کاهش می‌یابد.

تحلیل نتایج

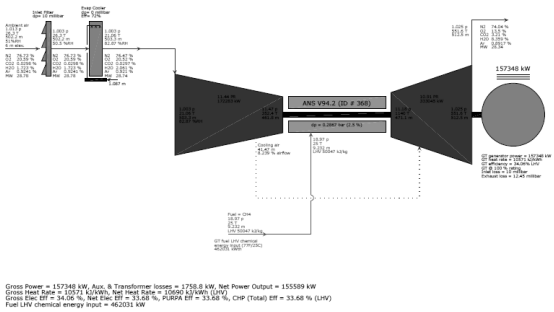
خلاصه‌ای از نتایج حاصل از نرم‌افزار در خصوص نیروگاه سنندج در جدول ۱ ذکر شده است. با توجه به این جدول و نمودار ۲۱ مشاهده می‌شود که مؤثرترین روش افزایش بازده در نیروگاه سنندج، استفاده از سیستم مه‌پاشی و روش خنک‌کاری تبخیری است که سبب افزایش بازده در حدود ۵ مگاوات می‌شود. بعد از این دو روش، سیستم‌های تبرید تراکمی و تبرید جذبی با افزایش بازده در حدود ۴ مگاوات در ردهٔ دوم قرار دارند. البته در این مرحله به بررسی اقتصادی روش‌ها اشاره‌ای نشده است و این تقسیم‌بندی صرفاً از نظر افزایش بازده صورت گرفته است. در خصوص نیروگاه خرمشهر نیز نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار سنندج در جدول ۲ خلاصه شده است.

بدون در نظر گرفتن بررسی اقتصادی، صرفاً از لحاظ کارایی با توجه به جدول ۲ و نمودار ۲۲ مشاهده می‌شود که مؤثرترین روش افزایش بازده در نیروگاه خرمشهر، استفاده از سیستم ایجاد مه و روش خنک‌کاری تبخیری است که سبب افزایش بازده در حدود ۶ مگاوات می‌شود. بعد از این روش‌ها نیز سستم‌های تبرید تراکمی و تبرید جذبی با افزایش بازده در حدود ۴ مگاوات در ردهٔ دوم قرار دارند.

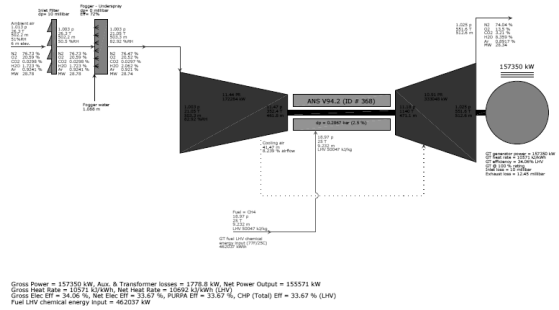
تحلیل فنی و اقتصادی روش‌های افزایش بازده

جدول ۳ نتایج محاسبات فنی و اقتصادی محاسبه‌شده برای روش‌های گوناگون افزایش بازده را در نیروگاه سنندج نشان می‌دهد. با استفاده از نتایج این جدول و نمودار شکل ۲۳ مشاهده می‌شود ایجاد مه از نظر افزایش توان و هزینهٔ احداث هر کیلووات، مناسب‌ترین روش است. بعد از آن،

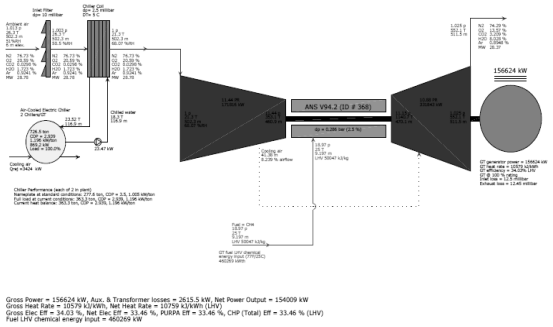
روش خنک‌کاری تبخیری پیشنهاد می‌گردد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از روش مه‌پاشی توان خروجی توربین حدود ۵ مگاوات افزایش می‌یابد؛ در صورتی‌که هزینه‌ها به ۴ دلار به ازای هر کیلووات کاهش پیدا می‌کند. جدول ۴ نتایج محاسبات فنی و اقتصادی محاسبه‌شده برای روش‌های گوناگون افزایش بازده را در نیروگاه خرمشهر را نشان می‌دهد. با استفاده از نتایج این جدول و نمودار شکل ۲۴ مشاهده می‌شود که روش مه‌پاشی از نظر افزایش توان و هزینهٔ احداث هر کیلووات، مناسب‌ترین روش می‌باشد.



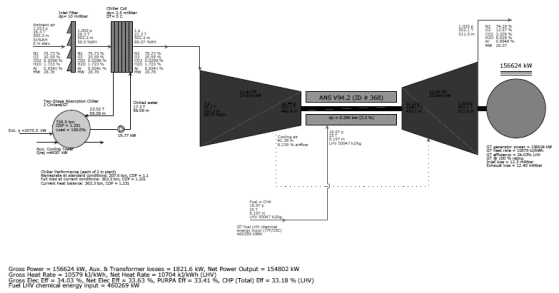
شکل ۱۷. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه خرمشهر
با استفاده از روش خنک‌کاری تبخیری



شکل ۱۸. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه خرمشهر
با استفاده از روش ایجاد مه



شکل ۱۹. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه خرمشهر
با استفاده از روش تبرید تراکمی هواخنک



شکل ۲۰. خروجی نرم‌افزار در نیروگاه خرمشهر ا استفاده از روش
تبرید جذبی دومرحله‌ای

بعد از آن روش خنک‌کاری تبخیری پیشنهاد می‌گردد. می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از روش ایجاد مه نیز توان خروجی توربین حدود ۶ مگاوات افزایش می‌یابد؛ حال آنکه هزینهٔ احداث به میزان ۴ دلار به ازای هر کیلووات کاهش می‌یابد.

جمع‌بندی

همان‌طور که بیان شد، از جمله مؤثرترین روش‌ها برای افزایش توان تولیدی و بازده توربین‌ها، سرمایش هوای ورودی به کمپرسور است. در این مقاله به بررسی روش‌های گوناگون افزایش بازده در توربین‌های گازی، از جمله روش سرمایش تبخیری، مه‌پاشی، سیستم تبرید تراکمی و سیستم تبرید جذبی از طریق شبیه‌سازی در نرم‌افزار ترمو فلو پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا روش‌های فوق روی توربین‌های نیروگاه سنندج و خرمشهر تحلیل فنی شده، نشان داده شد که در هر دو نیروگاه مؤثرترین روش استفاده از سیستم تبخیری و مه‌پاشی است.

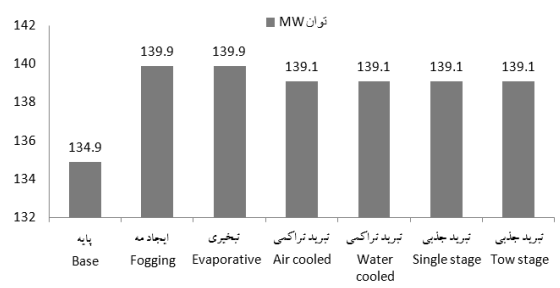
در ادامه به بررسی اقتصادی هر یک از روش‌ها از طریق میزان هزینهٔ تمام‌شده برای هر کیلو وات پرداخته و مشخص شد که استفاده از سیستم مه‌پاشی دارای کمترین هزینهٔ تمام‌شده است. از این‌رو از دیدگاه فنی و اقتصادی مناسب‌ترین روش برای افزایش بازده واحدهای گازی V94.2 استفاده از سیستم پاشش مه می‌باشد.

جدول ۱. مقایسهٔ کارایی روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه سنندج

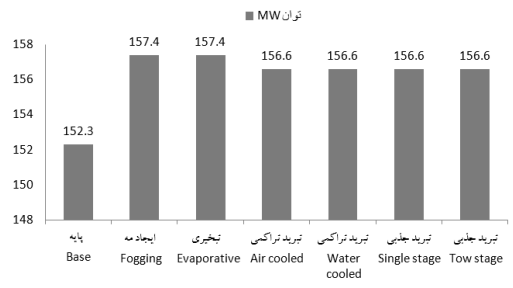
سیستم مورد استفاده	توان مگاوات	بازده درصد
پایه	۱۳۴/۹	۳۴/۳۳
روش مه‌پاشی	۱۳۹/۹	۳۴/۵۸
خنک‌کاری تبخیری	۱۳۹/۹	۳۴/۵۸
سیستم تبرید تراکمی هواخنک	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵
سیستم تبرید تراکمی آب‌خنک	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵

جدول ۲. مقایسهٔ کارایی روش‌های مختلف افزایش بازده در نیروگاه خرمشهر

سیستم مورد استفاده	توان مگاوات	بازده درصد
پایه	۱۵۲/۳	۳۳/۸
روش مه‌پاشی	۱۵۷/۴	۳۴/۱
خنک‌کاری تبخیری	۱۵۷/۴	۳۴/۱
سیستم تبرید تراکمی هواخنک	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳
سیستم تبرید تراکمی آب‌خنک	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳



شکل ۲۱. مقایسهٔ روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه سنندج



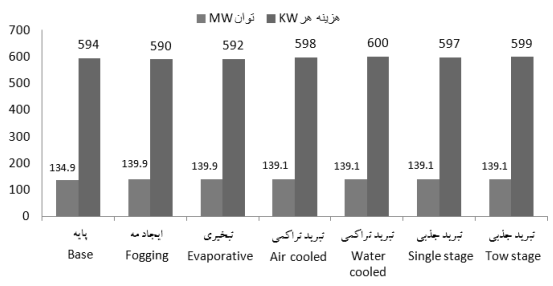
شکل ۲۲. نمودار مقایسهٔ روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه خرمشهر

جدول ۳. مقایسهٔ هزینه‌ای روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه سنندج

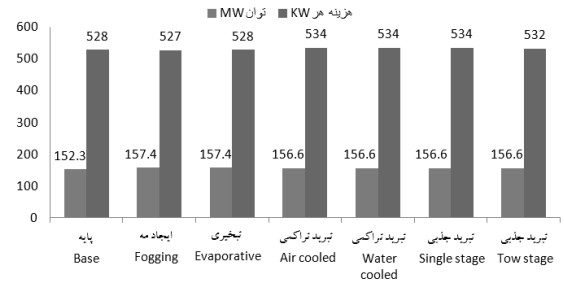
سیستم مورد استفاده	توان مگاوات	بازده درصد	هزینه به ازای هر کیلووات
پایه	۱۳۴/۹	۳۴/۳۳	۵۹۴
روش مه‌پاشی	۱۳۹/۹	۳۴/۵۸	۵۹۰
خنک‌کاری تبخیری	۱۳۹/۹	۳۴/۵۸	۵۹۲
سیستم تبرید تراکمی هواخنک	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵	۵۹۸
سیستم تبرید تراکمی آب‌خنک	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵	۶۰۰
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵	۵۹۷
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای	۱۳۹/۱	۳۴/۵۵	۵۹۹

جدول ۴. مقایسهٔ هزینه‌ای روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه خرمشهر

سیستم مورد استفاده	توان مگاوات	بازده درصد	هزینه به ازای هر کیلووات
پایه	۱۵۲/۳	۳۳/۸	۵۲۸
روش مه‌پاشی	۱۵۷/۴	۳۴/۱	۵۲۷
خنک‌کاری تبخیری	۱۵۷/۴	۳۴/۱	۵۲۸
سیستم تبرید تراکمی هواخنک	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳	۵۳۴
سیستم تبرید تراکمی آب‌خنک	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳	۵۳۴
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک تک‌مرحله‌ای	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳	۵۳۴
سیستم تبرید جذبی آب‌خنک دومرحله‌ای	۱۵۶/۶	۳۴/۰۳	۵۳۲



شکل ۲۳. نمودار مقایسهٔ هزینه‌ای روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه سنندج



شکل ۲۴. نمودار مقایسهٔ هزینه‌ای روش‌های گوناگون افزایش بازده در نیروگاه خرمشهر

مآخذ

[۱] زونتاگ، ون وایلن، بورگناک. *مبانی ترمودینامیک کلاسیک*، ترجمه ملک‌زاده، کاشانی حصار، مشهد: نشر نما، ۱۳۸۱.

[۲] مقیمیان، محمد. *مهندسی تهویه مطبوع و حرارت مرکزی*، مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۲.

[۳] شیرانی، ابراهیم. *توربوماشین‌ها*، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۹.

[4] R. Chacartegui. "Analysis of combustion turbine inlet air cooling systems applied to an operating cogeneration power plant." Thermal Power Group (GMTS), Department of Energy Engineering, University of Seville, Spain, 2008.

[5] R. K. Sullerey, Ankur Agarwal, "Performance improvement of gas turbine cycles" Science direct vol. 2, pp. 112- 120, 2006.

[6] Andryas Poullikkas, "An overview of current and Future sustainable gas turbine technologies", *Science direct*, pp. 409- 443, 2005.

[7] Tony Giampaolo, *Gas turbine handbook: principles and Practice*, Vol. 3, pp. 23-45, 2006.

[8] Jaber, Q. M., *Assessment of Power Augmentation from Gas Turbine Power Plants Using Different Inlet Air Cooling Systems*, Faculty of Engineering Technology, Al-Balqa' Applied University, Amman, Jordan, 2007.

پی‌نوشت

1. Siemens AG, http://www.siemens.com (accessed Aug 30, 2013)
2. Thermoflow ®
3. GT PRO ®
4. evaporative cooling
5. fogging
6. electric chiller
7. absorption chiller
8. overspray
9. air cooled electric chiller
10. water cooled electric chiller
11. single stage water cooled absorption chiller
12. two stage water cooled absorption chiller
13. single stage water cooled absorption chiller
14. two stage water cooled absorption chiller

آدرس : خیابان حافظ ، روبروی دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، کوچه آرژانتین ، پلاک ۲
فکس :۸۸۸۰۷۰۰۸ تلفن : ۸۸۸۹۲۱۴۴ ، ۸۸۸۹۵۹۶۹