نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۳، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۵۷، مهر و آبان ۱۴۰۳، صفحه ۲۷- ۱۶
ISSN: 1605-9719

DOI: https://doi.org/10.30506/mmep.2024.2025807.2169

نیروگاه های توربین گاز V94.2 و لزوم تبدیل آنها به سیکل ترکیبی

نعمت ا... مزروعی
دانشجوی دکتری

احمدرضا رحمتی*
دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه کاشان، کاشان

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

چکیده: غالب توربین های گاز بزرگ نصب شده در نیروگاه های کشور از نوع V94.2 و ساخت داخل است. با توجه به جایگاه این واحدها در صنعت برق و انرژی کشور، در این مطالعه نسبت به تبیین اهمیت تعمیر و نگهداری مدون این توربین ها، تعمیرات افزایش طول عمر و انجام فرآیند ارتقاء آنها اقدام گردیده است و اولویت و لزوم تبدیل این نیروگاه ها به سیکل ترکیبی و هزینه های مالی این فرآیند تشریح شده است. سپس محاسبه گردیده در صورت تبدیل این نیروگاه ها به سیکل ترکیبی، به ازاء هر بلوک در هر سال، حداقل معادل ۲۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی صرفه جویی خواهد شد. درصورت ترکیبی نمودن کل واحدهای گازی بزرگ کشور، سالانه حدود ۶ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی با ارزش فعلی نزدیک یک میلیارد دلار قابل صرفه جویی می باشد. همچنین با توجه به ویژگی های خاص دی اکسیدکربن در نقطه بحرانی ازجمله مقادیر پایین فشار و دما (۷۳/۸ بار و ۳۱ درجه سانتیگراد) چگالی بالا و ویسکوزیته پایین، مزایای کاربردی کردن سیکل های با این سیال عامل بویژه بعنوان جایگزین سیکل بخار در سیکل های ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون با این سیال عامل نیروگاه هایی تا ۲۵ مگاوات نیز در دنیا ساخته شده ولی هنوز به مرحله تجاری سازی نرسیده اند.

واژه‌های راهنما: توربین گاز V94.2، سیکل ترکیبی، صرفه جویی سوخت، دی اکسید کربن فوق بحرانی، انرژی

V94.2 gas turbine power plants and the necessity of conversion them to combined cycle

Nematollah Mazrouei
PhD Student

Ahmadreza Rahmati*
Associate Professor,
Department of Mechanical Engineering
University of Kashan,
Kashan

Abstract: Most of the large-scale gas turbines installed in Iranian power plants are V94.2 type and domestically made. Considering the position of these units in the electricity and energy industry of the country, in this research, the importance of regular maintenance and repair of these turbines, repairs to life time extension and their upgrading process have been explained. The priority and necessity of converting these power plants to combined cycle and the financial costs of this process have been described. Then it has been calculated that if these power plants are converted to combined cycle, at least equal to 200 million cubic meters of natural gas, annually will be saved for each block. If all the large gas units of the country are combined, it is possible to save about 6 billion cubic meters of natural gas annually with a current value of nearly one billion dollars. Also, considering the special characteristics of carbon dioxide at the critical point, including low pressure and temperature values, high density and low viscosity, the advantages of using the cycle with this working fluid and using it instead of the steam cycle in combined cycles have been investigated. Until now, power plants up to 25MW have been built with this working fluid in the world, but they have not yet reached the commercialization stage.

Keywords: V94.2 Gas turbine, Combined cycle, Fuel saving, sCO2, Energy

* نویسنده مسئول، ar_rahmati@kashanu.ac.ir

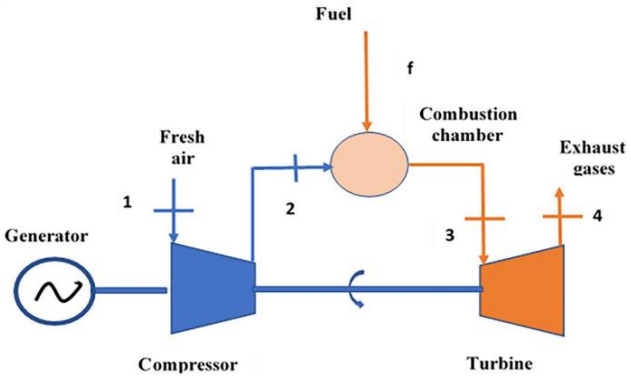
۱- مقدمه

درسال ۱۲۶۱ هجری شمسی (۱۸۸۲ میلادی) توماس ادیسون اولین مجموعه برق تجاری خود را برای تامین روشنایی در نیویورک افتتاح نمود. سه سال بعد، در سال ۱۲۶۴ هجری شمسی در زمان ناصرالدین شاه قاجار، اولین مولد برق به قدرت تقریبی ۳ کیلو وات به منظور تامین روشنایی بخشی از کاخ سلطنتی وارد ایران شد و به بهره‌برداری رسید. اولین مجوز تاسیس کارخانه برق یا همان نیروگاه تولید برق امروزی در کشور به یک بازرگان در سال ۱۲۸۵شمسی داده شد که اقدام به تاسیس اولین کارخانه برق عمومی در تهران نمود. از آن زمان تاکنون در نتیجه کوشش تلاشگران این صنعت، پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه حاصل گردیده و از لحاظ بین‌المللی کشورمان در جایگاهی در خور قرار گرفته است به‌طوری که بر اساس آمارهای سازمان ملل متحد، در سال ۱۹۹۵میلادی (۱۳۷۴شمسی) ایران از نظر گستردگی صنعت برق، در بین کشورهای غرب آسیا در مقام نخست قرار گرفت و در سطح جهانی نیز به مقام مقایسه بیست و یکم دست یافت.

در حال حاضر نیز از آنجایی‌که صنعت تولید برق همانند قلب تپنده‌ای جریان الکتریسیته را برای حرکت چرخه تولید در سایر صنایع و نیازهای شهری و روستایی در شبکه انتقال به جریان در می‌آورد، یک صنعت مادر و زیربنایی حائز اهمیت محسوب می‌گردد که در توسعه همه جانبه کشور نقش بی بدیلی اجرا می‌نماید.

توجه به انجام منظم تعمیرات مدون و همچنین نگهداری و بهره‌برداری اصولی و منطبق با دستورالعمل‌ها در نیروگاه‌های تولید برق موجب بهبود راندمان، افزایش توان خروجی، انتشار کمتر گازهای آلاینده و بهبودهای مختلف در قابلیت اطمینان و کاهش مخاطرات حین کارکرد آنها می‌گردد.

نیروگاه‌های حرارتی با ظرفیت بالا و رایج در کشور، عمدتاً نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی هستند. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با راندمان در محدوده ۵۰ درصد دارای بالاترین راندمان، نیروگاه‌های بخار با راندمان در محدوده ۴۰ درصد و نیروگاه‌های گازی با راندمان در محدوده ۳۰ درصد دارای کمترین راندمان می‌باشند. ولی با توجه به اینکه نصب و راه‌اندازی واحدهای گازی در مدت زمان کم و سریع قابل انجام است و در مدت یکسال می‌توان آنها را به مرحله تولید رساند؛ لذا دولت‌های مختلف بیشتر علاقمند به نصب و راه اندازی این واحدها بوده‌اند و با توجیه اینکه این واحدها با شماتیک کلی شکل (۱) در آینده به سیکل ترکیبی تبدیل خواهند شد موضوع پایین بودن راندمان آنها به حاشیه رفته است. در عمل بدلیل اینکه احداث بخش بخار این نیروگاه‌ها و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی علاوه بر زمان‌بر بودن(حدود ۳ سال) هزینه حدود دو برابری نسبت به بخش گازی با ظرفیت مشابه دارند؛ لذا ترکیبی نمودن بخش قابل توجهی از سیکل‌های گازی به تعویق افتاده که نتیجه آن هدر رفت مقادیر عظیمی از انرژی‌های قابل استحصال بوده است.



شکل۱ شماتیک سیکل توربین گاز و اجزاء اصلی آن

در سه دهه اخیر به علت افزایش تقاضای برق در شبکه برق کشور و همچنین فراهم بودن شرایط جهت صادرات مازاد به کشورهای همسایه، احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در کشور آغاز گردید و واحدهای متعدد گازی V94.2(کلاس E) با ظرفیت اسمی هریک بین ۱۵۹ تا ۱۸۳مگاوات و اخیراً نیز واحدهای گازی کلاس F با ظرفیت اسمی متوسط هریک حدود ۳۰۰ مگاوات به بهره‌برداری رسید، ولی احداث واحدهای بخار آنها و تبدیل واحدهای گازی به سیکل ترکیبی برای عمده این واحدها تاکنون محقق نگردیده است. مقدار و سهم ظرفیت انواع نیروگاه‌های موجود در کشور در جدول (۱) مشخص می‌باشد.

جدول ۱ مقدار و سهم ظرفیت انواع نیروگاه‌های موجود در کشور

ظرفیت نصب شده نیروگاهی	مقدار(MW)	سهم(درصد)
بخاری	۱۵۸۲۹	۱۷/۲
گازی	۲۳۱۴۷	۲۵/۲
چرخه ترکیبی	۳۵۷۱۹	۳۸/۹
برق آبی	۱۲۱۴۴	۱۳/۲
اتمی	۱۰۲۰	۱/۱
تولید پراکنده	۲۴۶۸	۲/۷
انرژی‌های تجدیدپذیر	۱۱۱۰	۱/۲
دیزلی	۴۰۵	۰/۴
کل ظرفیت نصب‌شده	۹۱۸۴۵	۱۰۰

برای احداث واحدهای بخار این نیروگاه‌ها، قرارداد بیع متقابل بین مالک نیروگاه و وزارت نیرو منعقد می گردد که بر مبنای آن وزارت نیرو متعهد می‌گردد در بازه زمانی مشخص نسبت به پرداخت هزینه سرمایه‌گذاری بر مبنای درآمد معادل سوخت صرفه جویی شده پس از کارکرد واحد بخار اقدام نماید.

تبدیل سیکل نیروگاه گازی به سیکل ترکیبی از نظر زیست محیطی، به دلیل عدم افزایش آلاینده‌ها در نتیجه افزایش تولید و همچنین پایین آمدن دمای گازهای داغ خروجی از دودکش نیروگاه از محدوده بزرگتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد به محدوده ۱۰۰ درجه سانتیگراد قابل توجه و حائز اهمیت است.

بویلرهای بازیاب حرارت[1] در سیکل‌های ترکیبی، به دلیل استفاده از انرژی موجود در گازهای داغ حاصل از احتراق و خروجی از توربین‌های گاز، مصرف سوخت قابل توجهی نخواهند داشت که این مطلب علاوه بر کاهش مصرف سوخت برای تولید هر کیلووات ساعت برق، موجب بهره‌وری بهتر سیستم و افزایش راندمان مجموعه موجود از محدوده $\frac{1}{3}$ به محدوده $\frac{1}{2}$ می گردد [۱]، [۲].

با در نظر گرفتن دو توربین گاز و یک توربین بخار بعنوان یک بلوک سیکل ترکیبی، توان تولید شده در واحد بخار با توان تولید شده در هر یک از واحدهای گازی برابری خواهد نمود.

جهت بازیافت انرژی هدررونده در توربین‌های گاز از ترکیب آنها با سیکل‌های دیگر از جمله آب شیرین‌کن‌ها [۳]، تولید بخار برای مصارف کارخانجات صنعتی و یا تولید آب گرم مصرفی نیز استفاده می‌گردد.

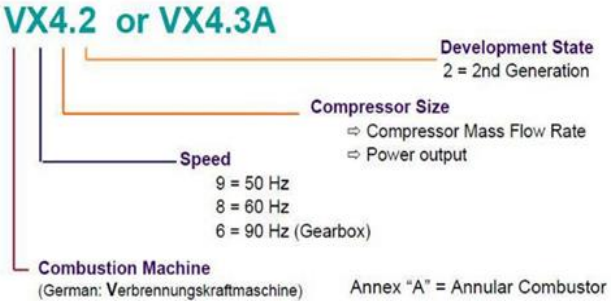
بهبود راندمان نیروگاه‌های تولید برق، یک پارامتر مهم عرصه انرژی در جهان محسوب می‌گردد و محققین زیادی در دنیا مشغول تحقق این امر می‌باشند. به همین دلیل تبدیل نیروگاه-های گازی به سیکل ترکیبی از اولویت و اهمیت زیادی برخوردار گردیده است [۴] که در این مطالعه علاوه بر تمرکز بر این موضوع از جنبه فنی و اقتصادی، افزایش طول عمر و ارتقاء نیروگاه‌های گازی رایج در کشور و بهره‌برداری بادوام و ایمن از این واحدها ازطریق رعایت دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری بررسی گردیده است. مقادیر هزینه‌ای ذکر شده جهت تبدیل واحدهای گازی به سیکل ترکیبی، مبتنی بر مبالغ قراردادهای واقعی در کشور می-باشد. همچنین استفاده از سیال عامل دی اکسیدکربن در سیکل‌های پایین دستی بعنوان یک مفهوم نوآورانه در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است.

یادآور می‌گردد با توجه به گستره و تنوع موضوعات مورد توجه در این مطالعه و همچنین مد نظر بودن واحدهای خاص موجود در کشور و کاربردی بودن مباحث، مطالعات تجمیعی مشابهی یافت نگردید ولی در هر موضوع بطور مجزا، مطالعات مرتبط قبلی در بخش مربوطه ارجاع داده شده است.

۲- توربین‌های گاز ساخت داخل

بیش از ۷۰ سال است توربین‌های گازی جهت تولید برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما در سه دهه اخیر تولید این نوع توربین-ها بسیار افزایش یافته است. در سال ۱۹۷۰ تقاضا به منظور نصب توربین‌های گازی با توان بالاتر افزایش یافت. شرکت زیمنس نیز با توجه به این تقاضا و دستیابی به بازار جهانی، توربین‌های سنگین مقیاس را توسعه داد و تولید توربین‌های V-type را در دستور کار قرار داد. مبنای اصلی این توربین موتور جتی است که در جنگ جهانی دوم بر روی هواپیماهای جنگنده مورد استفاده قرار گرفت. اولین توربین ۵۰ هرتز V94.2 زیمنس در سال ۱۹۸۱ در شهر والهیم آلمان نصب و راه اندازی شد [۵]. مدل ۶۰ هرتز همین توربین (V84.2) نیز در سال ۱۹۸۹ در هیدرو آمریکا مورد بهره‌برداری قرار گرفت. نام‌گذاری V94.2 مطابق سیستم شماتیک شکل (۲) می‌باشد.

توربوکمپرسورهای شرکت زیمنس از جمله مرغوب‌ترین تجهیزات دنیا در این زمینه محسوب می‌شود که طی قراردادی، انتقال تکنولوژی ساخت آن از اوایل دهه ۸۰ شمسی به جمهوری اسلامی ایران صورت پذیرفت.

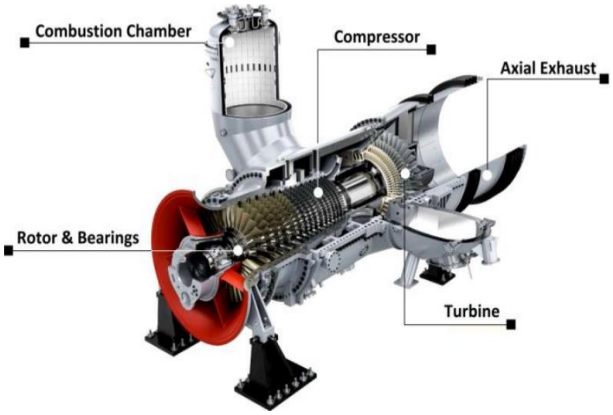


شکل ۲ سیستم نام‌گذاری شماتیک توربین گاز V94.2

در حال حاضر نیروگاه‌های گازی با ظرفیت در مقیاس بالای ۱۰۰ مگاوات در کشور عمدتاً از نوع V94.2 شرکت زیمنس می-باشند که ساخت آنها در کشور بومی‌سازی شده و روند ارتقاء این

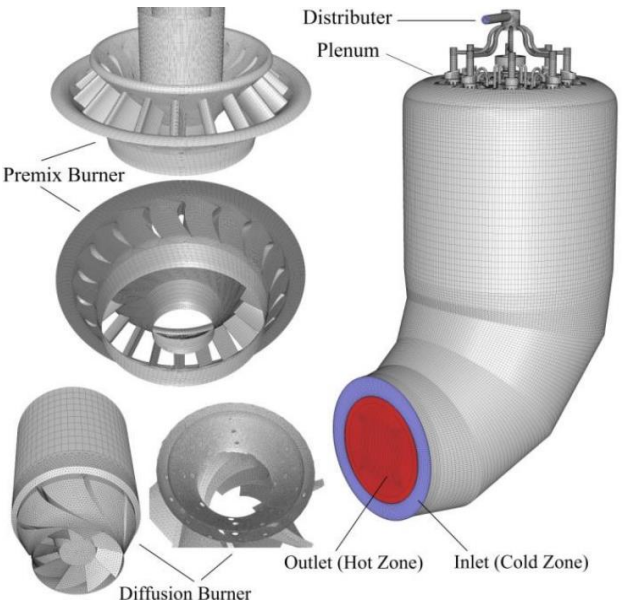
[1] Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

توربین ادامه دارد به‌گونه‌ای که هم‌اکنون در شرایط ایزو ظرفیت اسمی تولید آنها از ۱۵۹ مگاوات به ۱۸۳ مگاوات ارتقاء یافته است. در حال حاضر نیز انتقال تکنولوژی ساخت توربین‌های گازی کلاس F با ظرفیت اسمی بالای ۳۰۰ مگاوات در جریان است و تاکنون چندین واحد از این نوع در کشور نصب و راه‌اندازی گردیده‌اند. اجزاء اصلی و نمای برش خورده توربین گاز V94.2 در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.



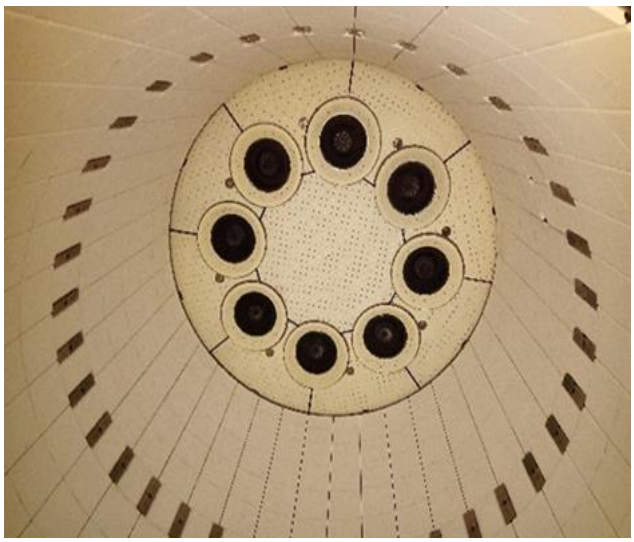
شکل ۳ نمای برش خورده و اجزاء اصلی توربین گاز V94.2 [۶]

توربین‌های V94.2 دارای دو محفظه احتراق سیلویی شکل با تعداد ۸ مشعل بر روی هر یک مطابق شکل‌های (۴) و (۵) می‌باشد و پوشش داخلی محفظه احتراق آنها از جنس یک نوع سرامیک می‌باشد که به راحتی قابل تعویض است.



شکل ۴ محفظه احتراق توربین گاز V94.2، قسمت‌های ورود هوای فشرده و خروج محصولات احتراق و نوع مشعل‌های آن [۶]

قابلیت دسترسی، اطمینان بالا از عملکرد، هزینه کم در مقابل توان تولیدی زیاد و قابلیت استفاده از سوخت‌های رایج کشور یعنی گاز و گازوئیل از مهم‌ترین فاکتورهای اقتصادی این نوع توربین می‌باشد. دمای مناسب سیال در ورودی به قسمت توربین[1] (حدود ۱۰۶۰ درجه سانتیگراد) سبب افزایش فاصله‌های زمانی تعمیرات و کاهش هزینه‌های سرویس و نگهداری نسبت به توربین‌های گازی قدیمی‌تر شده است.



شکل ۵ نمای زیرین داخل محفظه احتراق توربین گاز V94.2 و چیدمان مشعل‌ها و آجرهای نسوز

به‌دلیل اینکه در توربین‌های گاز، محصولات احتراق مستقیم وارد توربین شده و فرایند تبدیل گرما به کار صورت می‌گیرد، محفظه داخلی توربین بویژه پره‌ها در معرض دمای بالایی قرار دارند که کارکرد آنها در این محدوده‌های دمایی موجب تسهیل استهلاک و فرسودگی زودهنگام می‌گردد. بنابراین طول عمر توربین های گاز V94.2 نیز محدود است و عمدتاً به نوع رژیم کاری (در بار پایه، بار متوسط یا بار اوج)، نوع سوخت مصرفی، دمای گازهای داغ در ورودی توربین و شرایط محیطی بستگی دارد. اجزای این توربین گاز، در معرض تنش ناشی از حرارت یا بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مانند خزش، خستگی، فرسایش، اکسیداسیون و خوردگی و همچنین تنش و سایش مکانیکی قرار دارند که باعث پیری این توربین‌ها می‌شود.

به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان عملکرد واحد، افزایش راندمان، بازیابی تولید و کنترل میزان گازهای آلاینده ناشی از احتراق، انجام تعمیرات دوره‌ای منظم و متعدد از جمله تعمیرات اساسی برای آنها پیش‌بینی گردیده است.

[1] Turbine Inlet Temperature (TIT)

یکی از گلوگاه‌های واحدهای گازی، قطعات مربوط به محفظه داغ توربین‌هاست که به دلیل شرایط کاری و ترکیب مکانیزم‌های مخرب(خوردگی داغ، خزش و خستگی) دارای عمر محدود هستند و زمانی که عمر کاری آنها منقضی می‌شود باید با قطعات جدید جایگزین شوند؛ لذا در این زمان است که با انتخاب قطعات به روز شده و مناسب‌تر از قطعات قبلی، موضوع امکان ارتقاء کیفی که زمینه ساز ارتقاء کمی(بهبود شرایط کاری و نیز افزایش توان توربین نسبت به قبل از تعمیرات) است مصداق پیدا می‌کند.

مقدار افزایش توان، به نوع پکیج انتخابی برای ارتقاء که مشخص کننده قطعاتی است که جایگزین می‌شود بستگی دارد. در توربین گازهای V94.2 نصب شده در کشور در دهه‌های گذشته، این افزایش توان متناسب با ورژن واحد و پکیج انتخابی ارتقاء، بین ۴ تا ۲۴ مگاوات می‌تواند باشد.

توربین‌های گاز معمولاً برای عمر کاری ۱۰۰هزار تا ۱۶۰هزار ساعت کارکرد (حدود ۱۲ تا ۲۰ سال) طراحی می‌شوند. در طول عمر کارکرد یک توربین گاز، اثرات خوردگی و پیری و زوال‌های متالورژیکی شناسایی می‌شوند و قطعات برای بهبود کیفی در برابر آسیب، مقاوم سازی و بازطراحی می‌شوند [۷]، [۸]، [۹]. برای قطعات اصلی توربین مانند روتور که آسیب آن گاهی می‌تواند باعث آسیب به کل مجموعه و حتی خطرات جانی شود، ملاحظات ایمنی قابل توجهی لازم است تا اطمینان حاصل شود احتمال رخداد رویدادهای دارای مخاطره بسیار کم می‌باشد. عدم انجام اقدامات پیشگیرانه ممکن است منجر به حادثه برای دستگاه گردد که حتی اگر برای ایمنی نفرات مجاور آن مخاطراتی نداشته باشد ولی گاهاً به تعداد زیادی از قطعات مسیر داغ آسیب می‌رساند و باعث خارج از مدار قرار گرفتن طولانی مدت توربین و خسارت‌های مالی قابل توجه می‌گردد. بنابراین رعایت دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری این توربین‌ها حائز اهمیت می‌باشد که علاوه بر بازدیدها، تعمیرات و تعویض قطعات بویژه در مسیر گاز داغ، به ازاء هر ۳۳هزار ساعت کارکرد معادل[1]، یک تعمیرات اساسی برای این توربین‌ها در نظر گرفته شده است.

برخی از قطعات توربین گاز V94.2 مانند بخش‌هایی از روتور، علیرغم اینکه در مسیر گاز داغ قرار دارد ولی معمولاً در تعمیرات اساسی در طول عمر طراحی اولیه، بررسی و جایگزین نمی‌شوند که طبق دستورالعمل پیشنهادی طراح و سازنده اصلی این توربین، در تعمیرات اساسی کارکرد یکصد هزار ساعت، با اقدامات اضافه‌تر و دامنه بازرسی فراتر نسبت به تعمیرات اساسی قبلی، این بخش‌ها نیز بررسی می‌گردند. در این تعمیرات، اجزاء روتور باید به‌طور کامل جدا شوند، آزمایش‌های غیرمخرب و ارزیابی طول عمر[2] روی آنها انجام و پس از تحلیل نتایج و اقدامات لازم، اجزاء روتور مجدداً واجد شرایط و کیفیت مطلوب شوند. به‌دلیل جامع‌تر بودن تعمیرات در این مرحله، درصورتی‌که مراحل و اقدامات آن صحیح و کامل انجام پذیرد می‌توان به ویژگی‌های یک توربین یا واحد در حد نو با قابلیت اطمینان برای عملکرد در یک دوره دیگر(در حالت معمول حداقل تا دو تعمیرات اساسی بعدی) دست یافت و لذا تعمیرات اساسی این مرحله را فرایند تمدید طول عمر یا LTE[3] نامیده‌اند. یکی از بحث‌های کلیدی در این موضوع، تعیین عمر باقیمانده قطعات ۴ با تکنیک‌های متعدد و رایج می‌باشد که امکان افزایش طول عمر را فراهم می‌نماید.

بومی‌سازی تولید توربین‌های گاز V94.2 در کشور، افزایش تعداد واحدهای نصب شده و عبور کارکرد برخی از واحدهای نصب شده از میزان یکصد هزار ساعت، منجر به این گردیده که اقدامات تعمیراتی این واحدها و همچنین فرایندهای ارتقاء و به‌روزرسانی آنها و همچنین تعمیرات LTE از رونق و جایگاه خوبی در کشور برخوردار باشد.

۳- تبدیل نیروگاه‌های گازی V94.2 به سیکل ترکیبی

همانگونه که ذکر شد در دهه‌های گذشته تعداد قابل توجهی توربین گاز در کشور نصب و راه‌اندازی گردیده و با راندمان حدود ۳۰ درصد در حال کار می‌باشد ولی بدلیل اینکه احداث بخش بخار این نیروگاه‌ها و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی علاوه بر زمان‌بر بودن(حدود ۳ سال) هزینه بیش از دو برابری نسبت به بخش گازی با ظرفیت مشابه دارند؛ لذا ترکیبی نمودن بخش قابل توجهی از سیکل‌های گازی به تعویق افتاده که نتیجه آن هدر رفت مقادیر عظیمی از انرژی‌های قابل استحصال بوده است که لازم است تدابیر موثری در این زمینه اتخاذ شده و از زیان‌های بیشتر مالی و زیست محیطی جلوگیری نمود. یادآور می‌گردد تاکنون تدابیر گوناگونی جهت عملکرد بهینه این توربین‌ها لحاظ گردیده ازجمله تحلیل ترمودینامیکی [۱۰]، استفاده از سیستم‌های خنک‌کن هوای ورودی به توربین در تابستان [۱۱] ولی در نهایت بایستی به سیکل ترکیبی تبدیل گردند. جهت نیل به این هدف و انجام اقدامات مربوطه، مشابه سایر طرح‌های صنعتی و

[1] Equivalent Operating Hours (EOH)
[2] Life Assessment
[3] Life Time Extension
[4] Residual Life Time

عمرانی، اولین گام مربوط به انجام مطالعات امکان‌سنجی و توجیه فنی و اقتصادی می‌باشد. با توجه به احداث واحدهای گازی این نیروگاه‌ها در سال‌های اخیر، بسیاری از سرفصل‌های مربوط به مطالعات امکان‌سنجی مانند مطالعات راه‌های دسترسی، مطالعات پروژه‌های عمرانی در منطقه، مطالعات زمین شناسی و زلزله خیزی، مطالعات زیست محیطی، مطالعات نیروی انسانی و غیره قبلاً انجام پذیرفته و تقریباً می‌توان در این مقطع از نتایج آنها استفاده نمود ولی مطالعات اتصال به شبکه و مطالعات اقتصادی می‌بایست متناسب با شرایط موجود، انجام و به‌روزرسانی شود که نتایج مطالعات اقتصادی جهت اجرای طرح، با اهمیت و تعیین-کننده خواهد بود. خاطر نشان می‌گردد برای اضافه نمودن واحدهای بخار به مجموعه توربین‌های گازی موجود و تبدیل مجموعه به سیکل ترکیبی، آرایش‌های مختلفی را می‌توان متصور بود ولی چیدمان هر بلوک سیکل ترکیبی شامل یک واحد توربین بخار به ازای دو واحد توربین گاز به دلیل سادگی طرح، تسهیل در بهره‌برداری و تعمیرات، راندمان مناسب، قابلیت انعطاف در تغییرات بار تولیدی و نمونه‌های اجرا شده متعدد در کشور، آرایش مناسب و منتخب می‌باشد. بنابراین نوع چیدمان، توان تولید شده در واحد بخار هر بلوک سیکل ترکیبی با توان تولید شده در هر یک از واحدهای گازی برابری خواهد نمود. لذا در تبدیل نیروگاه‌های گازی موجود به سیکل ترکیبی، در نظر گرفتن یک واحد بخار با توان قابل تولید معادل توان تولید هر یک از توربین‌های گاز، آرایش مناسب و پذیرفته شده‌ای می‌باشد.

چنانچه هزینه‌های احداث واحدهای بخار این نیروگاه‌ها و تبدیل آنها به سیکل ترکیبی با واقعیت‌های موجود بررسی گردد می‌توان مطالعات اقتصادی و توجیه‌پذیری آنها را ارائه نمود. به همین منظور یک نیروگاه گازی شامل چهار واحد توربین گاز V94.2 را در نظر گرفته و هزینه‌های اجرای طرح ترکیبی نمودن آنها شامل احداث بخش بخار(شامل دو واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی و سیستم‌های وابسته) با توجه به هزینه پروژه‌های مشابه انجام شده در سال‌های اخیر معرفی می‌گردد. این هزینه‌ها شامل دو بخش می‌باشد، بخش اول هزینه تامین تجهیزات و ساخت و اجرا[1] یا هزینه EPC پروژه و بخش دوم هزینه‌های بلافصل اجرا یا هزینه‌های غیر EPC که این هزینه‌ها شامل هزینه‌های شرکت پروژه، هزینه مشاوران، هزینه‌های تامین آب، اتصال به شبکه، اخذ بیمه‌نامه‌ها، مجوزها، کارمزدها و موارد مشابه می‌باشد. شکست قیمت تقریبی خرید تجهیزات دو واحد بخار سیکل ترکیبی با احتساب هزینه گمرک به شرح جدول (۲) می‌باشد.

با احتساب سایر هزینه‌های اجرای این طرح از جمله هزینه مهندسی، ساختمانی، نصب و راه اندازی و هزینه‌های غیر EPC، هزینه تقریبی اجرای دو واحد بخار مطابق جدول (۳) می‌باشد.

بنابراین برای احداث هر واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی و تبدیل هر دو واحد توربین گاز V94.2 موجود به یک بلوک سیکل ترکیبی حدود ۱۳۰میلیون یورو هزینه اعتبار مالی بایستی در نظر گرفت.

جدول ۲ شکست قیمت تقریبی خرید تجهیزات دو واحد بخار سیکل ترکیبی با احتساب هزینه گمرک

ردیف	شرح	درصد	مبلغ(یورو)
۱	توربین و ژنراتور	۱۸/۵	۳۷،۰۰۰،۰۰۰
۲	بویلرها	۳۳	۶۶،۰۰۰،۰۰۰
۳	سیستم خنک‌کن	۱۶/۵	۳۳،۰۰۰،۰۰۰
۴	تجهیزات برق	۱۵/۵	۳۱،۰۰۰،۰۰۰
۵	تجهیزات ابزار دقیق	۹	۱۸،۰۰۰،۰۰۰
۶	*B.O.P*	۵	۱۰،۰۰۰،۰۰۰
۷	قطعات یدکی و ابزار مخصوص	۲/۵	۵،۰۰۰،۰۰۰
۸	جمع	۱۰۰	۲۰۰،۰۰۰،۰۰۰

جدول ۳ هزینه EPC اجرای دو واحد بخار سیکل ترکیبی با احتساب هزینه گمرک

ردیف	شرح هزینه‌ها	مبلغ(یورو)
۱	مهندسی	۱۲،۵۰۰،۰۰۰
۲	خرید تجهیزات، ماشین آلات و هزینه گمرک	۲۰۰،۰۰۰،۰۰۰
۳	حمل و نقل و بیمه	۷،۵۰۰،۰۰۰
۴	انجام عملیات ساختمانی و احداث بنا	۱۲،۵۰۰،۰۰۰
۵	نصب و راه اندازی	۱۷،۵۰۰،۰۰۰
۶	هزینه‌های غیر EPC	۱۰،۰۰۰،۰۰۰
۷	جمع	۲۶۰،۰۰۰،۰۰۰

با توجه به قوانین حمایتی موجود و همچنین عواید حاصل از تولید برق هر واحد بخار، درآمدها نیز می‌بایست به‌روز محاسبه گردیده و با داشتن هزینه و درآمد طرح، با راهکارهای موجود از جمله استفاده از نرم‌افزار کامفار، نتیجه اقتصادی طرح شامل مقادیر IRR[2]ها(نرخ بازده داخلی سرمایه) و دوران بازگشت

[1] Engineering, Procurement, Construction (EPC)

[2] Internal Rate of Return

سرمایه مشخص گردیده و با استفاده از آنها تصمیم‌گیری نهایی صورت خواهد پذیرفت.

یادآور می‌گردد با توجه به راندمان بالای سیکل‌های ترکیبی، ترکیبی شدن نیروگاه‌های بخار نیز مورد توجه می‌باشد [۱۲].

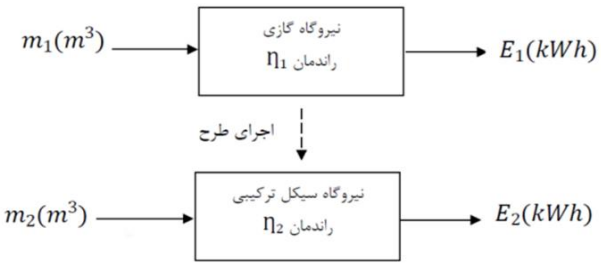
۴- سوخت صرفه‌جویی شده ناشی از تبدیل نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی

هر ساله راندمان متوسط هر یک از واحدهای نیروگاهی، متناسب با شرایط ساختگاه آن و میزان مصرف سوخت و تولید برقی که داشته‌اند محاسبه و اعلام می‌گردد. مقدار متوسط ارزش حرارتی سوخت‌های مختلف نیز در آزمایشگاه‌های مرجع مشخص می‌گردد. بعنوان نمونه در جدول(۴) مفروضات لازم برای محاسبه سوخت صرفه‌جویی شده ناشی از تبدیل واحدهای گازی V94.2 یک نیروگاه انتخابی به سیکل ترکیبی نشان داده شده است.

جدول ۴ مقادیر درنظر گرفته شده برای محاسبه سوخت صرفه‌جویی

مفروضات محاسبه سوخت صرفه‌جویی شده		
شرح	واحد	مقدار
راندمان واحدهای گازی	درصد	۳۱
راندمان کل سیکل ترکیبی	درصد	۴۸
ارزش حرارتی پایین سوخت	KJ/m^3	۳۴۸۳۶

مقدار سوخت صرفه‌جویی شده در نتیجه ترکیبی شدن نیروگاه مطابق شکل (۶) و رابطه (۱) قابل محاسبه است:



شکل ۶ شماتیک میزان سوخت مصرفی و انرژی تولیدی قبل و بعد از تبدیل یک نیروگاه گازی به سیکل ترکیبی

$$F=E_1\times\left(\frac{m_1}{E_1}-\frac{m_2}{E_2}\right) \qquad (۱)$$

این رابطه را وزارت نیرو از طرف سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت اعلام نموده که در این رابطه:

F: مقدار سوخت صرفه‌جویی شده (متر مکعب)

E_1: انرژی تولیدشده از طریق سیکل توربین‌های گاز (KWh)

E_2: انرژی تولید شده از طریق بلوک سیکل ترکیبی (KWh)

m_1: میزان گاز مصرفی بخش گازی برحسب مترمکعب

m_2: میزان گاز مصرفی بخش سیکل ترکیبی برحسب مترمکعب

برای محاسبه مقدار انرژی تولید شده ملاحظاتی منظور می‌گردد که با توجه به شرایط عرضه و تقاضای برق در شبکه در ساعات و روزهای مختلف، به دستور دیسپاچینگ در مواقعی بار واحد کاهش داده می‌شود و یا واحد از مدار خارج می‌گردد و همچنین واحد به‌دلیل تعمیرات و یا رفع اشکالات حادث شده دچار خروج‌هایی از مدار می‌گردد، لذا برای لحاظ کردن این موارد و مشخص شدن کارکرد واقعی هر نیروگاه در هر سال، عبارت "درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی نیروگاه" به شکل زیر تعریف شده است:

$$= 100 \times \frac{\text{انرژی تولیدی ناخالص}}{(8760)\text{کل ساعات سال} \times \text{قدرت عملی}}$$

سیکل‌های ترکیبی متناسب با آمارهای شرکت توانیر، در هر سال دارای بهره‌برداری از ظرفیت عملی مشخصی از نیروگاه بوده است؛ لذا متوسط توان تولیدی متناسب با این درصد عملی و استخراج ظرفیت تولید عملی میانگین نیروگاه بدست می‌آید.

با جایگذاری مقادیر یک بلوک سیکل ترکیبی مشخص که در بویلر بازیاب حرارت از مشعل اضافه نیز استفاده می‌کند تا تولید واحد بخار افزایش یابد و فرض ۷۴ درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی نیروگاه، مقدار سوخت صرفه‌جویی شده بدست می‌آید:

$$F=E_1\times\left(\frac{m_1}{E_1}-\frac{m_2}{E_2}\right)=260{,}500\times 8{,}760\times 0.74\times\left(\frac{86{,}798}{260{,}500}-\frac{88{,}325}{410{,}500}\right)=199{,}320{,}835\mathrm{Nm}^3$$

همانگونه که مشاهده می‌شود ترکیبی شدن هر بلوک از سیکل ترکیبی مورد نظر، منجر به صرفه‌جویی سالیانه حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی یا معادل تقریبی آن، ۱۷۰ میلیون لیتر گازوئیل خواهد شد که مقدار بسیار قابل توجهی است. مقایسه مقادیر سوخت مصرفی نیروگاه‌های گازی V94.2 و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که سالیانه توسط وزارت نیرو پایش می‌گردد با مقادیر محاسبه شده تطبیق خوبی را نشان می‌دهد. با فرض ظرفیت میانگین ۲۵ هزار لیتر برای هر تریلی تانکردار حمل گازوئیل، با ترکیبی شدن هر بلوک، سالیانه از مصرف ۶۸۰۰ تانکر گازوئیل در کشور جلوگیری خواهد شد و در صورت اجرایی‌شدن قانون رفع موانع تولید، عواید این صرفه‌جویی نصیب نیروگاه و کشور خواهد شد. خاطر نشان می‌گردد این مقدار صرفه‌جویی ناشی از ترکیبی شدن فقط یک بلوک سیکل ترکیبی نیروگاه‌های

رایج کشور(شامل دو واحد گازی و یک واحد بخار با ظرفیت هر واحد در محدوده ۱۶۰ مگاوات) می‌باشد.

با توجه به ظرفیت بیش از ۲۰ درصدی تولید برق کشور توسط واحدهای گازی و کثرت واحدهای گازی کلاس E و اخیراً نیز احداث واحدهای کلاس F که بیش از نیمی از ظرفیت نیروگاه‌های گازی کشور را تشکیل می‌دهند(در مقطع کنونی بیش از ۵۰ واحد گازی با ظرفیت تولید هر واحد حداقل ۱۶۰ مگاوات در شبکه برق کشور فعال است) بنابراین با ترکیبی نمودن این واحدها، سالانه بیش از ۵ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی صرفه‌جویی خواهد شد که بطور مستقیم یا تبدیل آن به انرژی الکتریکی، قابلیت صادرات خواهد داشت.

نتایج نشان می‌دهد با نرخ حدود ۱۵سنت دلار برای هر مترمکعب گاز طبیعی، در صورت اجرای طرح ترکیبی کردن هر دو واحد توربین گاز V94.2، سالانه ۳۰ میلیون دلار از محل صرفه‌جویی سوخت نصیب کشور خواهد شد و چنانچه کل واحدهای گازی با ظرفیت هر یک بیش از ۱۰۰ مگاوات موجود در کشور به سیکل ترکیبی تبدیل گردد نتایج نشان می‌دهد سالانه نزدیک به یک میلیارد دلار از محل صرفه‌جویی سوخت نصیب کشور خواهد شد. بنابراین تبدیل سیکل‌های گازی موجود به سیکل ترکیبی علاوه بر مزایای زیست محیطی، از نظر اقتصادی نیز با اهمیت و از اولویت قابل توجهی در کشور برخوردار می‌باشد.

۵- مقایسه اولویت احداث بخش بخار سیکل ترکیبی و احداث نیروگاه با پنل خورشیدی

امروزه با توجه به افزایش قیمت سوخت در دنیا و همچنین پیشرفت علم و تکنولوژی در استخراج و تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، استفاده از این انرژی‌ها بویژه انرژی خورشید در دنیا رونق گرفته است و احداث نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک و استخراج انرژی الکتریسیته از این منابع گسترش یافته است. بدلیل اینکه در کشور ما نیز این مسیر دنبال شده است مناسب می‌باشد در این مقطع و شرایط، اولویت احداث بخش بخار نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را با احداث نیروگاه خورشیدی نیز مقایسه نماییم. اهم نتایج این مقایسه را می‌توان به شرح زیر عنوان نمود:

الف- حداکثر مصرف برق در کشور غالباً در شب‌ها صورت می‌پذیرد که البته در روزهای گرم سال در ظهرها نیز مصرف به حداکثر می‌رسد لذا شبکه برق دارای یک پیک روز و یک پیک شب می‌باشد که وزارت نیرو تمام امکانات تولید را مصروف می‌دارد تا جوابگوی نیاز شبکه در ساعات پیک باشد. بدلیل اینکه تولید برق نیروگاه‌های خورشیدی فقط در ساعات روز محقق می‌شود و برای پیک شب بدون تاثیر است بنابراین سرمایه‌گذاری برای احداث این نیروگاه‌ها، کشور را از سرمایه‌گذاری در بخش بخار سیکل ترکیبی و در درجه بعد سرمایه‌گذاری برای احداث سایر نیروگاه‌های حرارتی و یا آبی برای پاسخگویی به پیک شب بی‌نیاز نخواهد کرد که در این صورت بایستی سرمایه‌گذاری مضاعف بعمل آید.

ب- متوسط تولید انرژی برق سالانه بخش بخار سیکل ترکیبی نسبت به تولید سالانه نیروگاه خورشیدی با همان قدرت نامی، حداقل ۴ برابر می‌باشد و این در حالی است که با نرخ‌های فعلی، هزینه مورد نیاز برای احداث بخش بخار سیکل ترکیبی نسبت به نیروگاه خورشیدی با همان قدرت نامی، حدود ۱/۵ برابر می‌باشد.

ج- از منظر اقتصادی، شاخص‌های مربوط به IRR و مدت زمان بازگشت سرمایه احداث بخش بخار سیکل ترکیبی، شرایط مطلوبتر و جذاب‌تری نسبت به احداث نیروگاه خورشیدی دارد.

د- با توجه به اینکه انرژی مورد نیاز در بخش بخار سیکل ترکیبی، از انرژی هدر رونده در گازهای داغ خروجی از اگزوز نیروگاه‌های گازی موجود تامین می‌گردد(در بویلر بازیاب حرارت)، لذا عملکرد بخش بخار سیکل ترکیبی از منظر انرژی، مشابه نیروگاه تجدیدپذیر خواهد بود و نیاز به مصرف سوخت مجزا ندارد مگر اینکه در نظر باشد توان بیشتری از آن واحد بدست آید.

هـ- انرژی حاصل از نیروگاه خورشیدی، از حوالی غروب آفتاب تا پس از طلوع آفتاب در روز بعد، قابل دسترس نیست در حالیکه بخش بخار سیکل ترکیبی در تمام ساعات شبانه روز قابل دسترس می‌باشد.

و- میزان توان تولیدی بخش بخار سیکل ترکیبی متناسب با مقدار انرژی برق مورد نیاز، همواره توسط بهره‌بردار قابل تنظیم و کنترل است(در بازه حداقل تا حداکثر توان قابل تولید واحد) درصورتیکه میزان توان تولیدی نیروگاه خورشیدی تابع شرایط تابش خورشید است و از کنترل بهره‌بردار خارج می باشد.

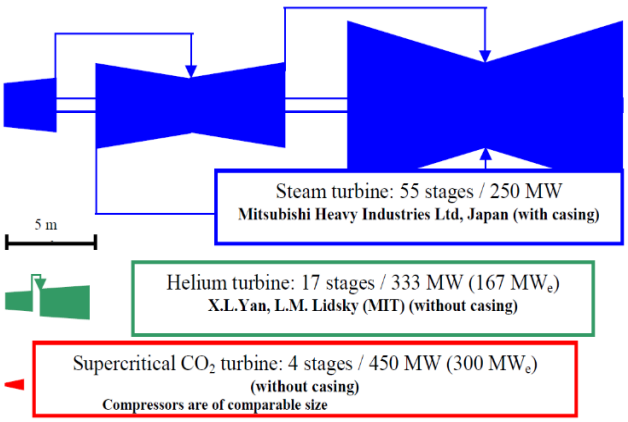
بنابر این تا زمانیکه نیروگاه‌های گازی بزرگ(بیش از ۱۰۰ مگاوات) به سیکل ترکیبی تبدیل نشده‌اند، اولویت تبدیل آن‌ها به سیکل ترکیبی بالاتر از اولویت احداث نیروگاه‌های دیگر ازجمله نیروگاه خورشیدی می‌باشد و از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

۶- آخرین وضعیت تحول چرخه پائین دستی سیکل‌های ترکیبی

علاوه بر اقدامات معمول جهت بهبود عملکرد بخش بخار سیکل-های ترکیبی موجود [۱۳]، [۱۴] با توجه به اینکه تاکنون سیالات عامل مختلفی مانند هوا، آمونیاک، دی اکسید کربن، هلیوم، نیتروژن و آب برای چرخه‌های تولید توان مورد استفاده قرار گرفته‌اند، برای چرخه پایین دستی سیکل‌های ترکیبی نیز بجای سیکل بخار که از سیال عامل آب استفاده می‌شود، سیکل‌های با سیالات عامل دیگر مانند هوا [۱۵] و دی اکسید کربن نیز در حال مطالعه هستند [۱۶]. سیکل‌های با سیال عامل دی اکسید کربن فوق بحرانی[1] بدلیل ویژگی‌های مربوط به آن، بیشتر مورد توجه قرار گرفته و مطالعات گسترده ای در مورد آن درحال انجام است [۱۷]، [۱۸]. هرچند نتایج خوبی نیز تاکنون حاصل شده و با این سیال عامل نیروگاه آزمایشی تا ۲۵ مگاوات نیز ساخته شده ولی هنوز به مرحله تجاری‌سازی نرسیده‌اند. ویژگی‌های خاص دی اکسید کربن در نقطه بحرانی، از جمله مقادیر پایین فشار و دما(۷/۳۸ مگاپاسکال و ۳۱ درجه سانتیگراد)، چگالی بالا و ویسکوزیته پایین، محاسن و مزیت‌های قابل توجهی برای کاربردی کردن سیکل‌های با این سیال عامل می‌باشد که از این ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مناسب بودن راندمان حرارتی
- جمع و جور بودن سیکل که منجر به کاهش وزن و حجم و سطح جایگیری تجهیزات می‌گردد.
- پایین بودن هزینه برق تولیدی
- کاهش قابل توجه مصرف آب ناشی ازتغییر فرآیند تولید توان نیروگاه
- قابلیت دسترسی و تامین سیال عامل

ویژگی منحصر به فرد و امیدوارکننده چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن، پتانسیل آن برای بهبود عملکرد تمامی سیکل‌های تولید توان است. اگر اهداف تحقیق و توسعه چرخه‌های فوق بحرانی دی اکسید کربن محقق شوند، فناوری فوق بحرانی دی اکسید کربن جایگزین بسیاری از چرخه‌های مرسوم در سیستم-های تولید توان خواهد شد زیرا دارای بازده خالص بالاتر، هزینه-های کمتر، وزن کمتر و سطح جایگیری کوچکتر تجهیزات و دستیابی به طرح‌های عملیاتی سریعتر می‌باشند. این مزایا درحالی قابل دستیابی هستند که عملکرد چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن تقریباً با تمام منابع اصلی انرژی حرارتی اولیه، از جمله انرژی هسته‌ای، انرژی خورشیدی، انرژی احتراق سوخت‌های فسیلی، انرژی زمین گرمایی، انرژی زیست توده و حتی استفاده از گرمای اتلافی سیستم‌ها بعنوان سیکل پایین دستی در چرخه‌های ترکیبی، قابل توجه و دستیابی می‌باشد. در شکل (۷) مقایسه اندازه توربین با سیال عامل بخار، هلیوم و دی اکسیدکربن بطور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۷ مقایسه اندازه توربین باسیال عامل بخار، هلیوم و دی اکسید کربن[۱۸]

چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن، قبلاً به سه دلیل اصلی نتوانست در صنعت تولید برق ایفای نقش کند:

(۱) هموار نبودن دسترسی به مواد مقرون به صرفه که بتواند در برابر دمای بالا و فشار بالا(۳۰۰-۲۲۰ بار) مقاومت کند.

(۲) در دسترس نبودن مبدل‌های حرارتی مناسب، کم هزینه و فشرده که گاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد از کل هزینه سرمایه‌گذاری در فناوری چرخه فوق بحرانی دی اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دادند.

(۳) در دسترس نبودن تجربه کافی و قابل اعتماد عملکرد توربوماشین‌های با سیال عامل دی اکسید کربن.

امروزه دو مانع اول از موانع فوق به‌نوعی برطرف شده و دیگر نگران‌کننده نیستند زیرا در طراحی و ساخت برخی نیروگاه‌ها، بخار فوق بحرانی به شرایط عملیاتی در حدود ۶۳۰°C و ۳۰۰ بار رسیده است [۱۹]. همچنین فناوری نسبتاً جدید مبدل حرارتی مدار چاپی[2] امکان‌پذیری انتقال گرما در سطوح فشرده و بسیار موثر را فراهم نموده که این مبدل‌ها دما و فشار بالایی را در مقایسه با مبدل‌های پوسته لوله‌ای معمولی تحمل می‌کنند [۲۰]. تحقیقات جهت بهبود عملکرد این مبدل‌ها نیز در جهان رونق گرفته و در حال انجام می‌باشد [۲۱].

[1]Supercritical Carbon dioxide (sCO2)

[2]Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE)

بعد از سال ۲۰۰۰ میلادی ساخت نمونه های عملی سیکل با سیال عامل دی اکسید کربن در چندین کشور افزایش یافت و امکان نصب واحدهای آزمایشی چرخه تراکم مجدد فوق بحرانی دی اکسید کربن در کلاس مگاوات مهیا شد که تحقیقات و بهینه‌سازی آنها با جدیت ادامه دارد [۲۲]، [۲۳]. چالش اصلی در عدم قطعیت ایجاد این سیکل‌ها، ارقام هزینه‌ای اجزای اصلی چرخه فوق بحرانی دی اکسید کربن که عمدتاً به دلیل جدید بودن آنها در بازار است می‌باشد. هم‌اکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در مراکز علمی و تحقیقاتی جهان در حال انجام است و انتظار می‌رود نتایج آنها به‌زودی محقق و تجاری گردد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به بومی سازی تولید توربین‌های گاز V94.2 در کشور، طی دو دهه گذشته غالب توربین‌های گاز نصب شده در شبکه برق کشور از این نوع می‌باشند. بکارگیری قطعات با فناوری بروز و توانمندتر بجای قطعات قبلی در موعد تعمیرات اساسی آن‌ها، انجام فرآیند به‌روزرسانی و ارتقاء این واحدها را محقق و منجر به افزایش توان تولید و بهبود ظرفیت شبکه می‌گردد. پس از کارکرد معادل یکصد هزار ساعت، این توربین به پایان چرخه عمر طراحی خود نزدیک می‌شود که با اعمال سومین تعمیرات اساسی که LTE نام‌گذاری شده، فرایند تمدید طول عمر و امکان کارکرد ایمن و مطمئن برای یک دوره مشخص دیگر(در حالت معمول حداقل تا دو تعمیرات اساسی بعدی) فراهم می‌گردد.

در صورت ترکیبی نمودن سیکل نیروگاه‌های گازی رایج کشور، به ازاء هر بلوک در هر سال، حداقل ۲۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی یا معادل آن ۱۷۰ میلیون لیتر گازوئیل، صرفه-جویی خواهد شد. درصورت تکمیل اجرای فرایند ترکیبی نمودن واحدهای گازی بزرگ در کشور، امکان صرفه‌جویی سالانه حدود ۶ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی فراهم که ارزش فعلی آن نزدیک یک میلیارد دلار می‌باشد. برای احداث هر واحد بخار۱۶۰ مگاواتی و تبدیل هر دو واحد توربین گاز *V94.2* موجود به یک بلوک سیکل ترکیبی، حداقل ۱۳۰میلیون یورو هزینه اعتبار مالی بایستی در نظر گرفته شود.

اولویت کشور در درجه نخست، تبدیل واحدهای گازی بزرگ موجود به سیکل ترکیبی و پس از آن، احداث سایر نیروگاه‌های با ظرفیت بالا از جمله نیروگاه‌های تجدیدپذیر و بویژه نیروگاه خورشیدی مورد نظر قرار گیرد.

ویژگی‌های خاص دی اکسیدکربن در نقطه بحرانی، محاسن و مزیت‌هایی برای کاربردی کردن سیکل‌های با این سیال عامل بویژه بعنوان جایگزین سیکل بخار در سیکل‌های ترکیبی را مورد توجه قرار داده است.

در چرخه برایتون فوق بحرانی، دی اکسید کربن به عنوان سیال عامل، یک مفهوم نوآورانه برای تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی در کاربردهای مربوط به تولید توان با استفاده از اتلافات حرارتی می‌باشد. به طور خاص، کاربرد سیستم های تولید برق از طریق سیکل با سیال عامل دی اکسید کربن، کوچک‌تر شدن اندازه تجهیزات، سطح جایگیری کمتر تجهیزات نیروگاه و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری را به‌دنبال خواهد داشت. بازده بالاتر این سیکل‌ها منجر به کاهش مصرف سوخت و آب و انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای خواهد شد. جذابیت ویژگی‌های اقتصادی و ترمودینامیکی چرخه‌های توان فوق بحرانی دی اکسید کربن، به افزایش توجه به چنین فناوری جدیدی کمک می‌کند و ترویج آن را تسریع می‌نماید. تاکنون با این سیال عامل نیروگاه‌های تا ۲۵ مگاوات ساخته شده ولی به مرحله تجاری‌سازی نرسیده و تحقیقات وسیعی در این زمینه در جریان می باشد.

۸- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

m	میزان گاز مصرفی(Nm^3)
E	انرژی (KWh)
HRSG	بویلر بازیاب حرارت
TIT	دمای ورودی توربین
EOH	ساعت کارکرد معادل (h)
LTE	افزایش طول عمر
EPC	مهندسی، خرید، اجرا
BOP	سیستم‌های جانبی سیکل
IRR	نرخ بازگشت داخلی سرمایه
KWh	کیلو وات ساعت
Nm^3	نرمال متر مکعب

علائم یونانی

η	بازده

۹- مراجع

[1] R. M. Hannun and M. M. Salih, "Converting Zubair oil field permanent power generation from single cycle into combined-cycle with plant exergy analysis," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1279, no. 1: IOP Publishing, p. 012058, 10.1088/1742-6596/1279/1/012058.

[2] S. C. Gülen and R. W. Smith, "Second law efficiency of the Rankine bottoming cycle of a combined cycle power plant," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 132, p. 011801 (10 pages), 2010, https://doi.org/10.1115/1.3124787.

[3] B. Haghghi, A. Saleh, H. Hajabdollahi, and M. S. Dehaj, "A combined cycle power plant integrated with a desalination system: Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis and multi-objective optimization," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 1688-1708, 2022, https://doi.org/10.1007/s11814-022-1098-z.

[4] E. Miliaras and P. Wilkinson, "Benefits of converting utility gas turbines to combined-cycle plants," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 1986, vol. 79337: Citeseer, p. V001T01A001, https://doi.org/10.1115/86-JPGC-GT-1.

[5] I. Diakunchak, H. J. Kiesow, and G. McQuiggan, "The history of the Siemens gas turbine," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2008, vol. 43123, pp. 923-935, https://doi.org/10.1115/GT2008-50507.

[6] A. Raja, A. A. Shirazpour, and M. Peiman, "Modification for Combustion Chamber of V94. 2 SIEMENS Gas Turbine in Diffusion Mode," in *2019 International Power System Conference (PSC)*, 2019: IEEE, pp. 195-201, 10.1109/PSC49016.2019.9081475.

[7] P. Slottner, "Life Extension of SIEMENS Industrial-Sized Gas Turbines," in *Proceedings of the 18th Symposium of the Industrial Application of Gas Turbines Committee, Banff, AB, Canada*, 2009, pp. 19-21, https://doi.org/10.1115/86-jpgc-gt-1.

[8] K. Sabri, M. O. Si-Chaib, and M. Gaceb, "Lifetime extension prediction of the rejuvenated first stage gas turbine blades," *Materials Science and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 46-54, 2020, https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1681157.

[9] T. Sanmugham, I. Ismail, and A. Said, "Life extension program and refurbishment of gas turbine parts after 100,000 EOH," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2035, no. 1: AIP Publishing, https://doi.org/10.1063/1.5075589.

[10] H. O. Egware and A. Obanor, "The investigation of an SGT5-2000E gas turbine power plant performance in Benin City based on energy analysis," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 16, p. 100316, 2022, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100316.

[11] H. O. Egware, U. P. Onochie, and H. Itoje, "Effect of incorporating fogging inlet air cooling system: a case study of Ihovbor Thermal Power Plant, Benin City," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 2173-2179, 2022, https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1722231.

[12] S. Nikbakht Naser Abad, K. Mobini, A. Mehrpanahi, and M. R. Ali Goodarz, "Technical analysis of conversion of a steam power plant to combined cycle, using two types of heavy duty gas turbines," *International Journal of Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 781-793, 2015, 10.5829/idosi.ije.2015.28.05b.17.

[13] O. R. Altarawneh, A. A. Alsarayreh, M. Ala'a, M. J. Al-Kheetan, and S. S. Alrwashdeh, "Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 31, p. 101852, 2022, https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101852.

[14] U. G. Azubuike, L. C. Egbuhuzor, H. O. Njoku, and O. V. Ekechukwu, "Exergy analysis of a steam power plant at full and partial load conditions," *International Journal of Exergy*, vol. 40, no. 2, pp. 182-197, 2023, https://doi.org/10.1504/IJEX.2023.128784.

[15] A. V. Mikheev and Y. M. Potanina, "Technical-economic evaluation of medium-power gas turbine plant with air bottoming cycle," in *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 114: EDP Sciences, p. 07005, https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911407005.

[16] Y. Jiang, L. Zhan, X. Tian, and C. Nie, "Thermodynamic Performance Comparison and Optimization of sCO2 Brayton Cycle, tCO2 Brayton Cycle and tCO2 Rankine Cycle," *Journal of Thermal Science*, vol. 32, no. 2, pp. 611-627, 2023, https://doi.org/10.1007/s11630-023-1708-z.

[17] J. Du, J. Guo, Z. Zhang, M. Li, F. Ren, and Y. Liu, "A triple cascade gas turbine waste heat recovery system based on supercritical CO2 Brayton cycle: Thermal analysis and optimization," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 16, p. 100297, 2022, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100297.

[18] V. Dostal, M. J. Driscoll, and P. Hejzlar, "A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors," Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering, 2004. [Online]. Available: https://web.mit.edu/22.33/www/dostal.pdf.

[19] A. Benato, S. Bracco, A. Stoppato, and A. Mirandola, "LTE: A procedure to predict power plants dynamic behaviour and components lifetime reduction during transient operation," *Applied energy*, vol. 162, pp. 880-891, 2016, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.162.

[20] K. Cheng, J. Zhou, H. Zhang, X. Huai, and J. Guo, "Experimental investigation of thermal-hydraulic characteristics of a printed circuit heat exchanger used as a pre-cooler for the supercritical CO2 Brayton cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 171, p. 115116, 2020, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115116.

[21] M. Searle, S. Ramesh, and D. Straub, "Optimization-Inspired Pin-Fin Array for Supercritical Carbon Dioxide Recuperator," *Applied Thermal Engineering*, vol. 241, p. 122335, 2024, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122335.

[22] A. S. Abdeldayem, S. I. Salah, O. A. Aqel, M. T. White, and A. I. Sayma, "Design of a 130 MW axial turbine operating with a supercritical carbon dioxide mixture for the SCARABEUS project," *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, vol. 9, no. 1, p. 5, 2024, https://doi.org/10.3390/ijtpp9010005.

[23] S. H. F. Alavi, S. Soltani, S. Mahmoudi, and M. A. Rosen, "A novel supercritical carbon dioxide combined cycle fueled by biomass: Thermodynamic assessment," *Renewable Energy*, vol. 222, p. 119874, 2024, https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119874.