

شبیه سازی واحد بهسازی یکپارچه سیکل ترکیبی با هدف تولید برق

محمد رضا جعفری نصر^{۱*}، مینا کوخایی^۲

^۱عضو هیئت علمی (دانشیار)، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۲گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۵/۱۴ پذیرش: ۹۴/۲/۱۴

مقدمه

به طور کلی توسعه صنعت برق سازگار با محیط زیست از اهداف کوتاه مدت صنعت برق کشور است. طبق بررسی های کارشناسی تا ۲۵ سال آینده نیاز جهانی انرژی حدود ۶۰ درصد افزایش می یابد و منابع انرژی- های فسیلی تا پایان قرن ۲۱ میلادی به اتمام می رسد [۹]. از این رو با رویکرد به جدیدترین فن آوری ها باید طرح ها، برنامه ها و اجرای کار به گونه ای انجام شود که همواره انرژی برق به صورت مطمئن و پایدار و هماهنگ با محیط زیست (توسعه پایدار) تولید شود. در این راستا برنامه ریزی های کوتاه مدت و بلند مدت در بخش های تولید، نظارت و هماهنگی با دیگر واحدهای مرتبط صنعت برق و وزارت نفت (در زمینه سوخت نیروگاه ها) جهت تأمین برق مطمئن و اقتصادی بر عهده معاونت برنامه ریزی و توسعه شرکت توانیر نهاده شده است [۲].

با توجه به مصرف روزافزون انرژی در جهان نیاز به استحصال بیش تر منابع انرژی امری اجتناب ناپذیر است. همچنین استفاده از منابع انرژی شناخته شده و متداول صدمات عظیمی به محیط زیست، اقتصاد و اجتماع وارد می نماید. از این رو هیدروژن سبک ترین عنصر و گاز موجود در طبیعت به عنوان حامل انرژی سالم که در قرن آتی جهت جایگزینی بخشی از سوخت های فسیلی مورد بهره برداری قرار خواهد گرفت. سوخت هیدروژن به عنوان منبعی تجدیدپذیر، پاک و فراوان تر از سوخت های فسیلی می تواند کاربرد زیادی برای نیروگاه ها و وسایل حمل و نقل داشته باشد و جامعه را از مصرف سوخت های فسیلی و پیامدهای آن دور نگه دارد. از آن جا که سوخت هیدروژن قدرت احتراق را افزایش می دهد و آلاینده هایی مثل مونواکسید کربن و هیدروکربن های نسوخته تولید نمی کند، سوختی بسیار کارآمدتر نسبت به گزینه های دیگر مانند متان و پروپان می باشد. در واقع بهره وری موتورهای هیدروژنی در مقایسه با موتورهای بنزینی معمولی بسیار بالاتر است؛ همچنین برخلاف بنزین و سوخت دیزل، نشت هیدروژن به اتمسفر هرگز آسیب نخواهد زد [۵]. مزایای استفاده از انرژی هیدروژن را می توان به شرح ذیل بیان نمود:

*nasrmrj@ripi.ir

- هیدروژن دارای بازدهی بالا در مقایسه با سایر سوخت‌های مرسوم است.
 - حمل هیدروژن به راحتی امکان پذیر است.
 - ذخیره‌سازی و استفاده مجدد آن به سادگی انجام پذیر است.
 - در کاربردهای مختلف انعطاف پذیری دارد.
 - ایجاد آلودگی زیست محیطی نمی‌نماید و محصول سوختن آن با هوا، آب بوده که قابل استفاده است.
 - مهم‌ترین و مؤثرترین سوخت شیمیایی برای پیل سوختی^۱ است.
- برای تولید هیدروژن روش‌های مختلفی وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان به دو روش عمده زیر که نسبت به سایر روش‌ها داری اولویت هستند اشاره کرد [۴].
- اصلاح هیدروکربن‌های سبک، که امروزه برای تولید هیدروژن استفاده می‌شوند.
 - اکسیداسیون جزئی پسماند^۲ یا هیدروکربن‌های سنگین یا همان فرآیند گازی سازی^۳
- گاز سنتز به مخلوط‌های گازی اطلاق می‌شود که محتوی منوکسیدکربن و هیدروژن به نسبت‌های مختلف باشند. هیدروژن و منوکسیدکربن دو ماده مهم در صنایع شیمیایی محسوب شده و دارای مصارف و کاربردهای فراوانی است. منوکسیدکربن در تولید رنگ‌ها، پلاستیک‌ها، فوم‌ها، حشره‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، اسیدها و غیره به کار می‌رود. از جمله مصارف هیدروژن نیز می‌توان به تولید آمونیاک، هیدروژناسیون و هیدروکراکینگ اشاره نمود [۳].
- ترکیب درصد گاز سنتز تولیدی بستگی به نوع هیدروکربن به کار رفته، عامل تغییر شکل دهنده و مقدار آن، شرایط عملیاتی و نوع کاتالیست دارد. برخی از مشخصه‌های جالب فن‌آوری تولید گاز سنتز عبارتند از [۵]:
- تولید محصولی که می‌تواند هم در طی فرآیند تولید الکتریسیته و هم به عنوان ماده اولیه در تولید مواد شیمیایی یا سوخت مورد استفاده قرار گیرد.
 - توانایی فرآوری طیف گسترده‌ای از مواد خام شامل زغال سنگ، نفت سنگین، محصولات سنگین پالایشگاهی، پسماندهای پالایشی (مایع و جامد)، پسماندهای کشاورزی، زیست توده^۴ و هیدروکربن‌های سبک (گاز طبیعی)
 - زدودن آلودگی‌های مواد اولیه و تولید محصول گازی (گاز سنتز) تمیز
 - تبدیل پسماندها یا محصولات دارای ارزش پایین به محصولات با ارزش بالا
- در این مقاله منبای تولید گاز سنتز، گاز طبیعی است. قسمت اعظم گاز طبیعی را متان تشکیل داده است. در گاز طبیعی ناخالصی‌هایی از جمله هیدروکربن‌های سنگین‌تر از متان و پروپان، دی اکسید کربن، ترکیبات گوگردی مانند سولفید هیدروژن، مرکاپتان‌ها و نیتروژن وجود دارد. لذا در صورت تبدیل گاز

¹ Fuel Cell

² Partial Oxidation

³ Gasification

⁴ Biomass

طبیعی به گاز سنتز و بهره‌گیری از آن در تولید مواد شیمیایی و برق، هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی بسیار به صرفه خواهد بود [۷].

فرآیندهای مختلف برای دستیابی به برق به ترتیب شامل:

- فرآیند گازی سازی و تولید گاز سنتز
- تبدیل مونواکسید کربن موجود در گاز سنتز به دی‌اکسید کربن
- جدا سازی دی‌اکسید کربن از گازهای خروجی از رآکتور
- تولید برق از هیدروژن در توربین گاز
- بازیافت حرارت از گازهای داغ توربین گاز جهت تولید بخار
- تولید برق در سیکل بخار

اهداف کمی و کیفی در این پژوهش

در این مقاله یک فرآیند چرخه ترکیبی بهسازی یکپارچه^۱ را به منظور کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و افزایش میزان بهره‌وری فرآیند تولید برق مورد بررسی قرار گرفته است. اهداف کیفی این مطالعه را به صورت زیر می‌توان بیان کرد؛

- استفاده بهینه از منابع سرشار گاز طبیعی با هدف تولید گاز پاک سنتز
- تبدیل گاز سنتز به سوخت هیدروژن جهت استفاده در نیروگاه‌های برق
- جذب دی‌اکسید کربن به منظور استفاده در نیروگاه‌های سوخت فسیلی و تولید آن به عنوان محصول جانبی نیروگاه [۱]

- جلوگیری از ورود گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه کربن به اتمسفر و جلوگیری از گرم شدن و آلودگی هوا
 - افزایش بهره‌وری در تولید برق در مقایسه با سیکل ترکیبی
- اهداف کمی آن عبارتند از:

- توان ورودی کلی واحد بر اساس ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی معادل ۹۱۲ مگاوات
- کل توان تولیدی ناخالص واحدهای بخار و توربین گاز ۵۳۴ مگاوات
- توان خالص تولیدی واحدهای گازی و بخار جمعاً ۴۶۳ مگاوات
- بازیافت و تولید حدود ۴۸۰۰۰ تن گاز دی‌اکسید کربن و جلوگیری از اتلاف آن و افزایش ارزش افزوده محصولات نیروگاه
- توان ورودی گاز سنتز ۱۰۵۳ مگاوات
- توان تولیدی ناخالص توربین گازی حاصل از گاز سنتز ۶۱۰ مگاوات
- توان خالص تولیدی توربین گاز حاصل از گاز سنتز معادل ۳۵۷ مگاوات

^۱ Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)

نیروگاه‌های راندمان بالا با آلاینده‌گی بسیار کم به روش سنتز گاز متان

روش تحقیق

در این مقاله یک فرآیند بهسازی یکپارچه سیکل ترکیبی^۱ شبیه سازی شده و ضمن تجزیه و تحلیل، مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج این مطالعه با تحقیقات انجام شده توسط آقای لازر اولوف نرد^۲ مقایسه شده است [۱۱].

مقدار خوراک گاز طبیعی ورودی به فرآیند همانند شبیه سازی واحد مرجع انجام شده است. با توجه به تغییرات اعمال شده بر شبیه سازی، راندمان کمی بالاتر از سایت مرجع می باشد. این نیروگاه شامل ۳ واحد اصلی و تعدادی واحدهای جانبی می باشد. واحدهای اصلی شامل موارد ذیل می باشند:

الف: واحد بهسازی گاز طبیعی

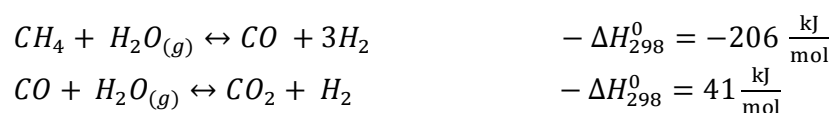
ب: بخش جداسازی دی اکسید کربن و متراکم سازی آن

ج: بخش تولید برق از گاز سنتز

شماتیک کلی فرآیند به شرح شکل (۱) می باشد. بخش تولید برق شامل توربین گاز، توربین بخار و واحد مولد بخار بازیاب حرارتی می شود. در داخل این واحد مولد بخار مبدل‌های حرارتی با سطوح فشار مختلف قرار دارند. فرآیند بهسازی طی یک فرآیند تک مرحله‌ای در ریفرمر خودگرمایشی انجام می شود. این قسمت به بخش‌های احتراق، منطقه حرارتی و منطقه کاتالیزوری تقسیم شده است. گرمای تولید شده از بخش احتراق در رآکتور خودگرمایشی، حرارت لازم برای تولید بخار و منطقه کاتالیزوری را فراهم می کند. واکنش سوختن متان بدین صورت است:



در منطقه حرارتی و کاتالیستی که پس از بخش احتراق هستند، واکنش‌های اصلی عبارتند از واکنش جابجایی آب-گاز و واکنش بهسازی بخار-هیدروکربن.



در بخش جابه‌جایی آب-گاز که در دو رآکتور جابجایی دما بالا^۳ و جابجایی دما پایین^۴ انجام می شود، قسمت اعظم کربن مونوکسید از طریق واکنش ذکر شده به کربن دی اکسید و همچنین آب به هیدروژن تبدیل خواهد شد. پس از خروج جریان از رآکتورهای جابه‌جایی آب-گاز حدود ۹۸٪ از کربن دی اکسید در بخش

^۱ Integrated Reforming Combined Cycle (IRCC)

^۲ Olof Nord, Lars

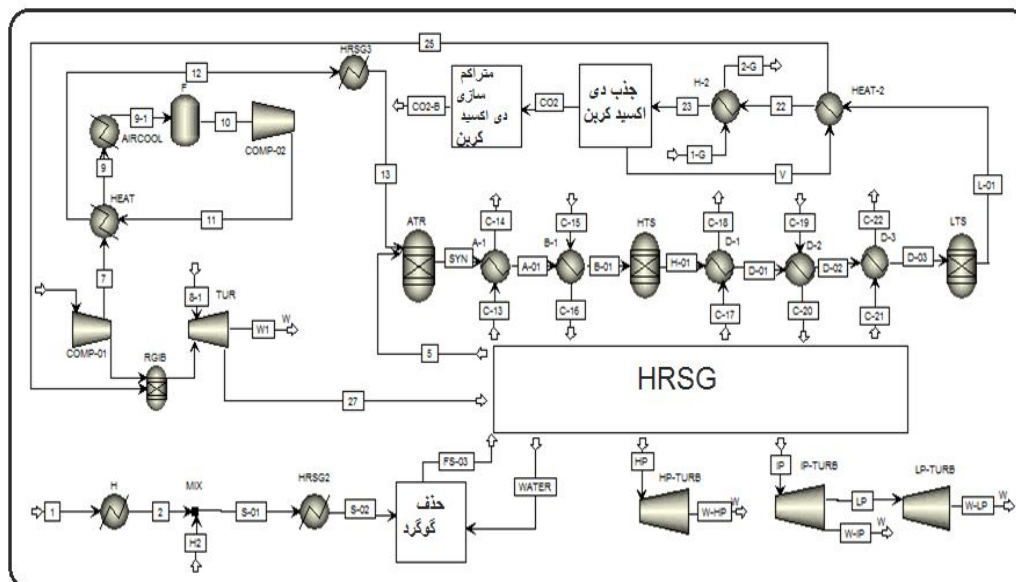
^۳ High Temperature Shift (HTS) Reactor

^۴ Low Temperature Shift (LTS) Reactor

جذب دی اکسید کربن جدا می‌شود و سوخت غنی از هیدروژن خارج شده از این بخش در توربین گاز با رقیق شدن توسط نیتروژن سوزانده شده و حرارت آن جهت تولید بخار و برق استفاده می‌شود. در رآکتور بهسازی خودگرمايشی هوا دمیده می‌شود؛ به همین دلیل مقدار قابل توجهی نیتروژن در گاز سنتز وجود خواهد داشت که از آن به عنوان رقیق کننده سوخت برای کاهش آلودگی ترکیبات NO_x در محفظه احتراق توربین گاز استفاده می‌شود. (همچنین در صورت تزریق آب در توربین از تولید گازهای اکسید نیتروژن کاسته و مقدار توان تولیدی توربین نیز افزایش خواهد یافت [۱۰]). (تکنولوژی فاگ و مدیا^۱)

هوای مورد نیاز برای رآکتور خودگرمايشی از تخلیه کمپرسور توربین گاز تأمین می‌شود (فشار و مقدار جریان اولیه هوا توسط یک شیر کنترل بادی به کمپرسور کنترل می‌شود) و سپس افزایش فشار این هوا توسط یک کمپرسور انجام می‌شود.

تولید حرارت در فرآیند بهسازی منجر به تولید میزان قابل توجهی بخار می‌شود. بخار تولیدی فرآیند به مبدل‌های خنک کننده گاز سنتز عرضه شده و در اثر جذب حرارت افزایش دما یافته و سپس جهت استفاده از حرارت آن به چرخه بخار وارد می‌شود. دمای جریان خارج شده از توربین گاز نزدیک به $600^\circ C$ است و این گاز یک بار هوای ورودی به واحد بهسازی، یک بار جریان گاز طبیعی قبل از ورود به بخش حذف گوگرد و یک بار جریان گاز طبیعی پس از خروج از بخش حذف گوگرد را گرم می‌کند و بدین سان دمای آن تا حدود $530^\circ C$ کاهش یافته و جهت رفع این کاهش دما همان‌طور که قبلاً ذکر شد از گاز طبیعی استفاده می‌شود. سپس این گاز برای گرم کردن جریان آب فرآیند در مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود.



شکل ۱. شمای کلی فرآیند IRCC

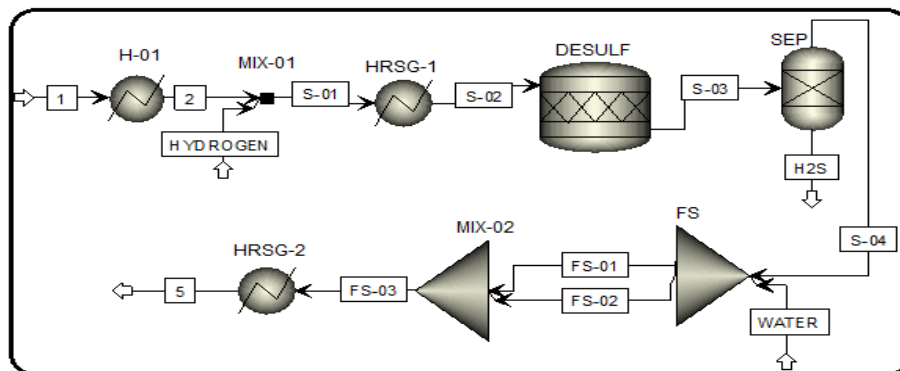
^۱ Fug & Media

شرح فرآیندها:

بخش بهسازی گاز طبیعی^۱

اگر به پیشینه مطالعاتی نگاهی بیاندازیم، مشاهده می‌شود که بیش‌تر از RKS برای بخش گاز سنتز استفاده شده است [۸].

با مقایسه نتایج مطالعات انجام شده درمی‌یابیم که بهتر است از معادله حالتی استفاده کنیم که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است. پس با توجه به موارد گفته شده و این‌که خود برنامه معادله حالت RKS-BM را توصیه کرده است؛ در این پایان‌نامه هم از همین نوع معادله حالت جهت بخش بهسازی استفاده شده است. گاز طبیعی جریانی از مواد خام شامل هیدروکربن و گوگرد است که به عنوان گاز خشک حاوی حداکثر ۴۰ ppm گوگرد تحویل داده شده است. گوگرد موجود در گاز طبیعی برای کاتالیست‌ها بسیار زیان‌آور است و به عنوان سم کاتالیزور است. واحد گوگرد زدایی می‌تواند این مقدار را تا ۵ ppm کاهش دهد. فرآیند شبیه‌سازی جداسازی گوگرد در شکل (۲) آورده شده است. در این بخش از ۴ بلاک استفاده شده است که شامل ۲ مخلوط‌کننده (Mixer)، ۱ رآکتور (Rstoic) و ۱ جداکننده (Split) هستند. همچنین در ۳ بخش نیاز به افزایش دما داریم که جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی از گرمای حاصل شده در بخش مولد بخار بازیاب حرارتی استفاده شده است.



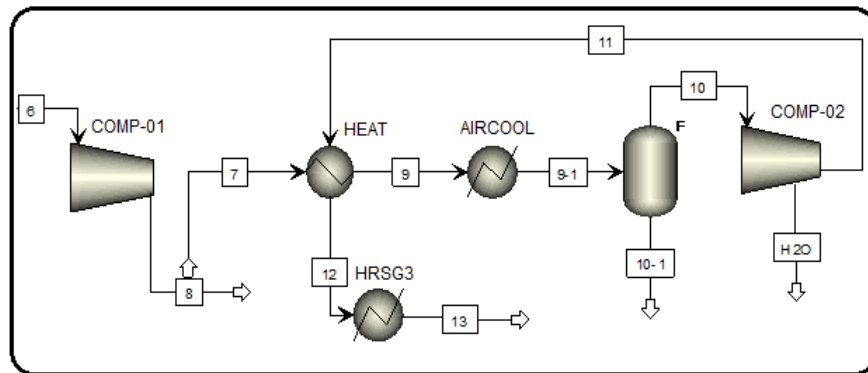
شکل ۲. شماتیک فرآیند حذف گوگرد

آماده سازی هوا

هوای مورد استفاده در فرآیند قبل از ورود به بخش بهسازی نیاز به آماده سازی دارد. هوا دارای فشار ۱ اتمسفر و دمای ۱۵ درجه است که از محیط گرفته شده است. در شکل (۳) فرآیند آماده سازی هوا آورده شده است. در میزان اجزاء تشکیل دهنده هوا شامل ۲۹ درصد اکسیژن و ۷۱ درصد نیتروژن به عنوان اجزاء اصلی در نظر گرفته شده و میزان جریانات بخش آماده‌سازی هوا، آورده شده است. در این قسمت به ۵ بلاک نیاز داریم که شامل ۲ عدد کمپرسور که در ASPEN PLUS تحت عنوان Compr هستند، ۱ عدد مبدل

^۱ Natural Gas Reforming

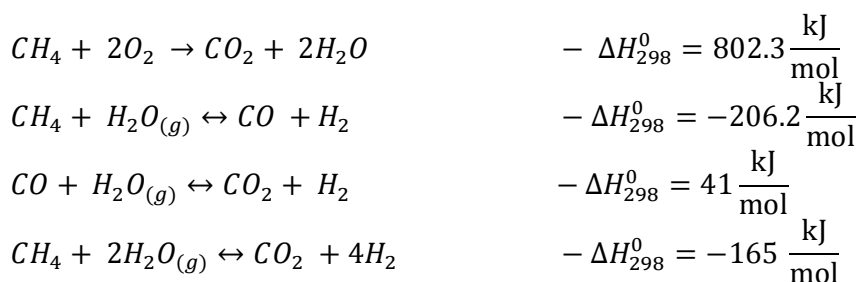
حرارتی تحت عنوان Heatx، اگرم کننده (Heater) و ۱ دستگاه جداکننده گاز- مایع که از بلاک Flash استفاده شده است.



شکل ۳. فرآیند آماده سازی هوا

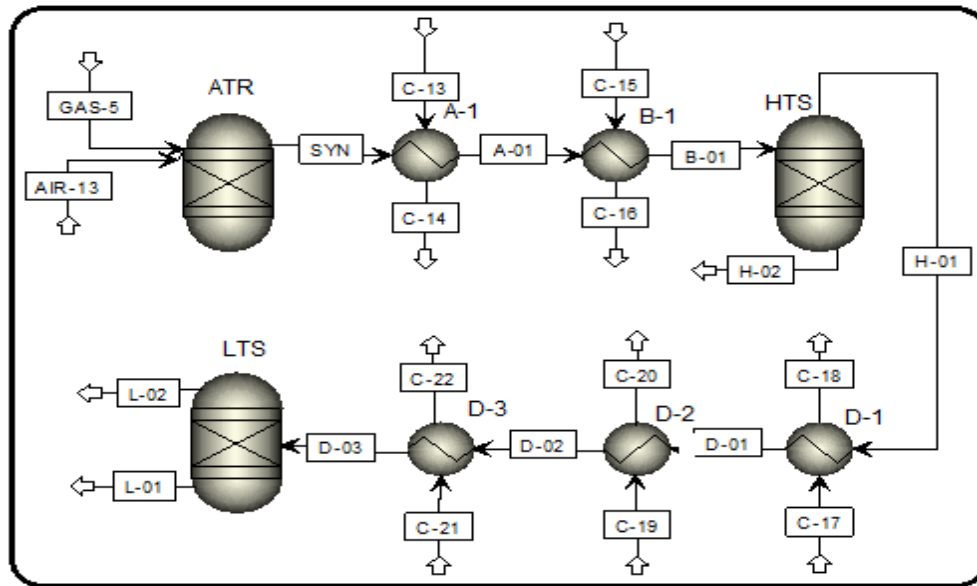
راکتور بهساز حرارتی

با توجه به موارد ذکر شده در بخش‌های قبلی فرآیند انتخاب شده یک فرآیند بهسازی خودگرمایشی متان بر پایه تولید گاز هیدروژن است. به طور کلی بدون در نظر گرفتن نوع فرآیند، بهسازی متان یک عملکرد شیمیایی مهم در جایگاه انرژی جهانی است؛ زیرا این فرآیند شیمیایی اولین مرحله کاتالیستی تبدیل گاز طبیعی به منظور به دست آوردن جریان گاز هیدروژن با ارزش، با درجه خلوص بالاست. جریان گاز طبیعی که با بخار آب، جهت انجام بهسازی توسط بخار که بخشی از فرآیند است، مخلوط شده است به همراه هوا وارد راکتور بهساز خودگرمایشی می‌شود. واکنش‌های انجام شده به صورت زیر هستند:



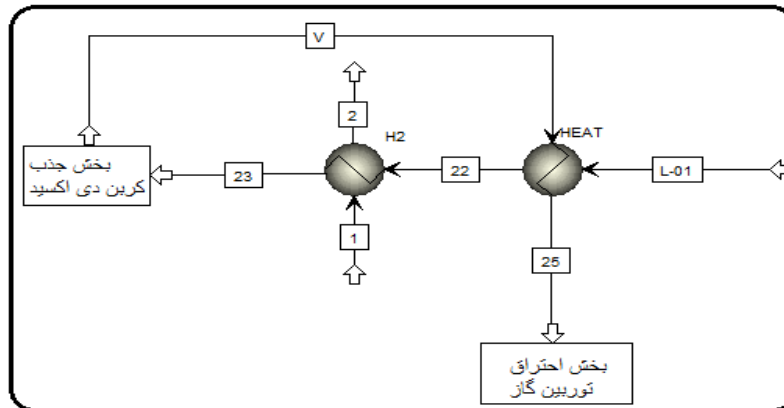
در واحد بهسازی گاز طبیعی که عاری از گوگرد شده است با مقداری از بخار آب فوق اشباع مخلوط گشته، پس از عبور از پیش‌گرمکن واحد مولد بخار بازیاب حرارتی با نسبت معین و دمای 500°C وارد یک راکتور اصلاح خودگرمایشی می‌شود. پس از انجام واکنش گاز خروجی دارای دمای 950°C است، که باید خنک شود. برای این منظور از مبدل حرارتی جهت بازیافت استفاده شده است. بدین ترتیب که جریان وارد مبدل

حرارتی اول شده و تا 450°C خنک می‌شود و سپس وارد مبدل حرارتی دوم شده و تا دمای 355°C خنک می‌شود.

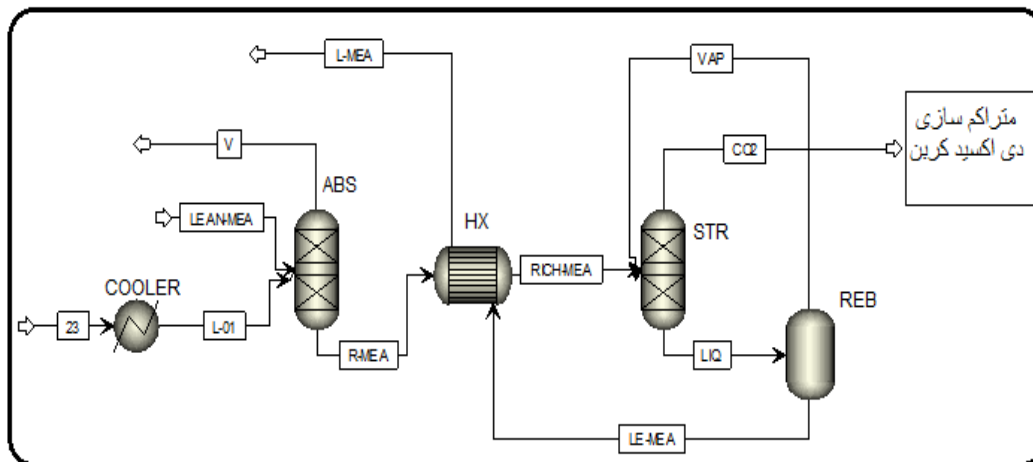


شکل ۴. شماتیک فرآیند بهسازی به همراه جابجایی آب-گاز

جریان خروجی از رآکتور بهسازی خودگرمایشی وارد مرحله بعدی یعنی رآکتور جابجایی آب-گاز شده و در دو رآکتور دما بالا و کم دما، واکنش‌های ذکر شده صورت می‌گیرند و کربن مونواکسید به کربن دی‌اکسید، همچنین آب به هیدروژن تبدیل می‌شوند. جریان خروجی از مولد بخار بازیاب حرارتی دارای دمای 431°C می‌شود که دوباره نیاز به خنک‌سازی توسط مبدل‌های گرمایی دارد. خنک‌سازی در این بخش توسط ۳ مبدل حرارتی انجام می‌شود و این جریان پس از عبور از این مبدل‌ها به دمای 212°C رسیده و برای بخش دوم جابجایی آب-گاز آماده است که نهایتاً وارد رآکتور شیفتم دما پایین می‌شود. پس از انجام واکنش در این قسمت جریان به دمای 240°C می‌رسد. حال باید این جریان وارد بخش جذب دی‌اکسید کربن شود. فرآیند بخش بهسازی گاز طبیعی و جابجایی آب-گاز در شکل (۴) آورده شده است. جریان خروجی از بخش جابجایی آب-گاز دارای دمای 240°C است که لازم است قبل از ورود به بخش جذب کربن دی‌اکسید خنک شود، این خنک‌سازی در دو مبدل حرارتی انجام می‌شود که در مبدل حرارتی اول جریان خنک‌کننده همان جریان گاز سنتز عاری از کربن دی‌اکسید است که از بخش جذب آن بیرون می‌آید و در مبدل حرارتی دوم این جریان همان جریان گاز طبیعی خام ورودی در اول فرآیند است. جریان پس از خنک شدن وارد بخش جذب کربن دی‌اکسید می‌شود. شماتیک این بخش در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. شماتیک بخش گرم کننده گاز



شکل ۶. شماتیک فرآیند جذب دی اکسید کربن

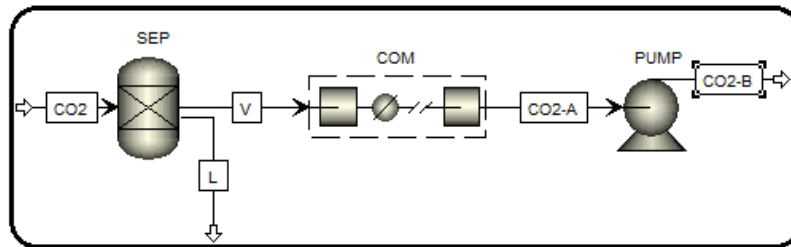
روش جذب CO_2 در این فرآیند، با استفاده از جاذب مونو اتانول آمین^۱ صورت گرفته است که واکنش‌های آن در مراجع موجود می‌باشند. [۹]

متراکم سازی دی اکسید کربن

مقدار دی اکسید کربن تولید شده از فرآیند بهسازی متان قابل توجه است و با توجه به مضراتی که وجود گازهای گلخانه‌ای در هوا دارند، مقدار زیاد آن موجب آلودگی محیط زیست می‌شود، بنابراین باید توجه بیشتری به کنترل میزان نشر این گاز داشته باشیم. از آنجایی که این گاز در صنایع مختلف مصارف بالایی دارد، می‌توان آن را پس از جذب متراکم کرد و به عنوان یک محصول جانبی به فروش رساند [۱۲].

^۱ Mono Ethanol Amine (MEA)

جریان حاصل از بخش جذب دی اکسید کربن نیاز به فشرده سازی دارد؛ زیرا با این کار دی اکسید کربن به عنوان یک محصول جانبی با ارزش تولید می شود و همچنین از ورود آن به عنوان گاز گلخانه ای به اتمسفر جلوگیری به عمل خواهد آمد. این عمل در بخش متراکم سازی انجام می شود. شماتیک فرآیند و جدول جریان ها در شکل (۷) آورده شده است.



شکل ۷. شماتیک بخش متراکم سازی دی اکسید کربن

بخش تولید برق

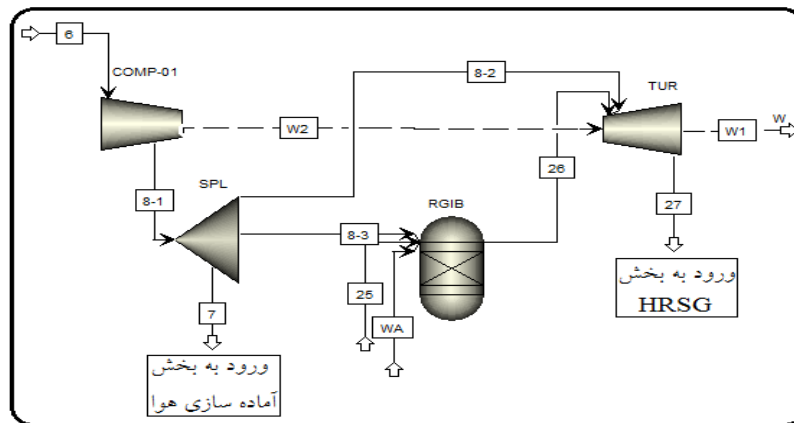
توربین گاز

در توربین های جدید با قدرت بالا میزان گاز خروجی از اگزوست توربین، هم از نظر دمای خروجی و هم از نظر میزان گاز مقدار قابل توجهی است که با پیش بینی یک دستگاه دیگ بخار بازیاب در انتهای چرخه و عبور گاز داغ از روی لوله ها، می توان آب موجود در دیگ بخار بازیاب را تحت فشار مشخصی تبدیل به بخار سوپرهیت نموده و از آن در یک توربین بخار استفاده کرد.

با ادغام چرخه های توربین گازی و توربین بخار، مراحل ترمودینامیکی جدیدی با بالاترین و پایین ترین درجه حرارت به وجود می آید که به موجب آن به چرخه ایده آل کارنو نزدیک می شود و در نهایت نیروگاه جدید دارای راندمان بالایی با توجه به دو نوع نیروگاه گازی و بخاری را داراست و موجب می گردد که راندمان این نوع نیروگاه ها از راندمان بزرگ ترین واحدهای بخاری با بخار سوپرهیت و با بخار پیش گرمایش هم بیشتر شود و همچنین از هدر رفتن انرژی جلوگیری شود.

همان طور که در شکل (۵) مشخص است، جریان ۲۵ وارد توربین گاز می شود. توربین گاز از سه بخش تشکیل شده است: کمپرسور، بخش احتراق و بخش تولید برق. در قسمت کمپرسور، هوای مورد نیاز فرآیند تحت فشار قرار گرفته و متراکم شده است، (همان طور که در بخش آماده سازی هوا اشاره کردیم). مقداری از این هوا به همراه جریان ۲۵ جهت تولید برق وارد بخش احتراق خواهد شد. جریان خروجی از این قسمت وارد توربین تولید برق می شود. جهت افزایش میزان برق تولیدی از توربین گاز در این شبیه سازی مقداری آب گرم که از جریان گاز دودکش استخراج می شود، به بخش احتراق توربین گاز وارد می گردد. لازم به ذکر است که در واحد مرجع این کار انجام نشده است. شماتیک فرآیند و نمودار جریان ها در شکل (۸) آورده شده است.

جریان ۲۵ که عاری از دی اکسید کربن و حاوی درصد بالایی از هیدروژن و نیتروژن است به همراه مقداری از جریان هوای فشرده شده در کمپرسور برای احتراق وارد رآکتور می‌شوند. پس از انجام واکنش در این بخش جریان حاصل به دمای بالای 1383°C می‌رسد. این جریان وارد بخش توربین تولید برق شده و در آنجا به همراه قسمت دیگری از هوای فشرده شده که به منظور خنک سازی وارد شده و همچنین آب گرم، تولید برق می‌نماید. جریان خروجی از این قسمت دارای دمای نزدیک 610°C است و از این دمای بالا جهت پیش‌گرمایش برخی از جریان‌ها و تولید بخار مورد نیاز فرآیند در قسمت مولد بخار بازیاب حرارتی استفاده می‌شود.



شکل ۸. شماتیک توربین گاز

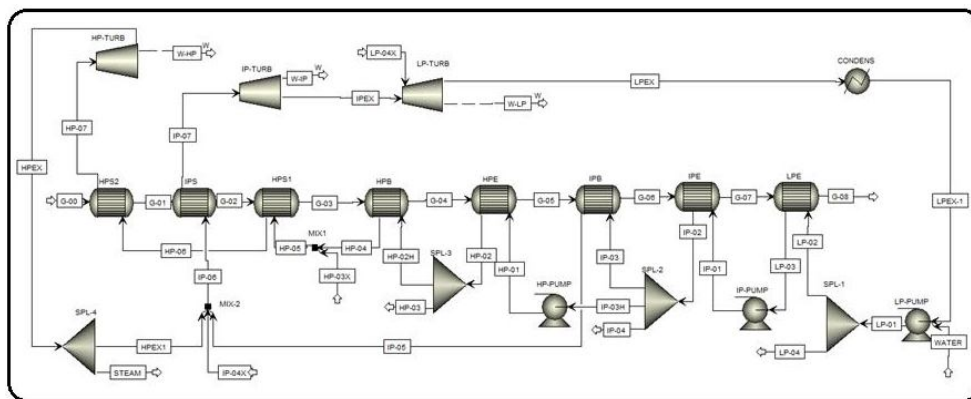
جدول ۱. مشخصات و نتایج مربوط به توربین گاز

هوای ورودی به فرآیند	
۶۴۲/۱	مقدار هوای ورودی به کمپرسور (kg/s)
۹۱/۹	مقدار هوای استخراج شده برای فرآیند رفورمینگ خودگرمایشی (kg/s)
۱۴/۳	درصد هوای استخراج شده برای فرآیند رفورمینگ خود گرمایشی (%)
۸۴/۶	مقدار هوای ورودی به توربین گاز (kg/s)
۱۳/۱	درصد هوای ورودی به توربین گاز (%)
۴۶۵/۶	مقدار هوای ورودی به بخش احتراق توربین گاز (kg/s)
۷۲/۵	درصد هوای ورودی به بخش احتراق توربین گاز (%)
الکتریسیته	
۷۰۹/۶	میزان توان گاز سنتز ورودی (LHV)
۴۹۸/۸	برق تولیدی توربین
۲۳۹/۹	برق مصرفی در کمپرسور
۲۵۳/۵	برق خالص خروجی از بخش توربین گاز
-	آب گرم ورودی به بخش احتراق
مشخصات کلی توربین	
۱۶/۲	نسبت فشار کمپرسور
۹۹/۸	بازده مکانیکی (%)
۹۲	بازده ایزنتروپیک (%)
۳۵/۷	بازده کلی توربین گاز (%)

با توجه به اهمیت نقش توربین گاز در این فرآیند، مشخصات و نتایج مربوط به این بخش در جدول ۱ نمایش داده شده است.

توربین بخار

در چرخه بخار برق جهت فروش، و بخار برای استفاده در داخل سیستم تولید می‌شود. چرخه بخار شامل دو بخش ژنراتور بخار بازیافت حرارت و توربین بخار می‌شود که در بخش اول یک بازیابی حرارت تولید بخار که شامل یک سری از مبدل‌های حرارتی، تبخیرکننده‌ها، سوپرهیترها و پیش‌گرمکن‌ها است. با قدرت تولید بخار آب در دو سطح فشار متوسط و فشار بالا که مورد بررسی قرار گرفته است و در بخش دوم، توربین بخار یک سری تشکیل شده از دو توربین با دو فشار خروجی متفاوت است که از بخار تولید شده استفاده کرده و تولید برق می‌نمایند. توربین دوم از نوع پس فشاری بوده و در دو مرحله کاهش فشار انجام می‌دهد و فشار بخار خروجی را به زیر فشار اتمسفر می‌رساند.



شکل ۹. شمایی از فرآیند HRSG

مقادیر فشار بخار در نظر گرفته شده برای بازیابی حرارت تولید بخار، ۳۶ و ۱۳۵/۶ بار هستند و همچنین فشار خروجی از توربین‌های بخار ۰،۷۵/۳ و ۳۶ بار است که مربوط به سه سطح فشار مشخص شده‌اند. شماتیک فرآیند در شکل (۹) آورده شده است.

عملیات صورت گرفته در این بخش را به منظور ساده‌سازی به سه دسته کم فشار، فشار متوسط و فشار بالا تقسیم کرده و هر یک را به‌طور جداگانه شرح می‌دهیم.

سمت کم فشار:

جریان خروجی از توربین کم فشار که محتوی کل مقدار آب استفاده شده در چرخه بخار است در یک کندانسور به فشار ۲ بار رسیده و جهت افزایش فشار آن تا مقدار معین شده برای بخش کم فشار وارد پمپ کم فشار می‌شود. در این قسمت مقداری آب به فرآیند اضافه می‌شود. (مقدار اضافه شده پس از عبور از مبدل‌های حرارتی و توربین فشار بالا جهت انجام بهسازی متان توسط بخار از سیستم خارج می‌شود).

پس از افزایش فشار جریان آب تا میزان ۳ بار وارد یک جداکننده شده و بخش کوچکی از جریان جهت استفاده در بخش جابجایی آب-گاز به منظور خنک‌سازی گاز سنتز، از جریان اصلی جدا می‌شود. میزان باقی مانده از جریان آب وارد یک اکونومایزر کم فشار شده و گرم می‌شود (LPE). جریان خروجی جهت افزایش فشار، وارد پمپ فشار متوسط می‌شود. جریان بخار خارج شده از بخش جابجایی آب-گاز، به همراه جریان خارج شده از توربین فشار متوسط وارد توربین کم فشار می‌شود، در آنجا افت فشار پیدا کرده و فشار آن از ۳ بار به ۰/۷۵ بار می‌رسد و تولید برق می‌نماید.

سمت فشار متوسط:

جریانی که با فشار ۳۶ بار بخش کم فشار را ترک کرده به منظور افزایش دما وارد اکونومایزر فشار متوسط (IPE) شده و پس از خروج از این مبدل حرارتی افزایش دما پیدا کرده و وارد یک جداکننده شده و به سه بخش تقسیم می‌شود. بخش اول در بویلر فشار متوسط (IPB) به بخار اشباع تبدیل می‌شود و بخش دوم برای افزایش فشار و ورود به بخش فشار بالا وارد پمپ فشار بالا می‌شود، و بخش سوم به منظور خنک‌سازی گاز سنتز به مبدل‌های حرارتی رآکتور جابجایی آب-گاز می‌رود.

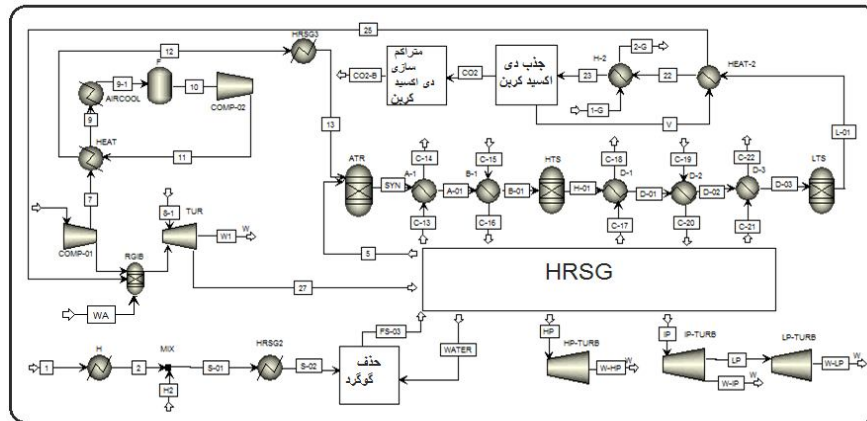
بخار اشباع حاصل با جریان خروجی از توربین فشار بالا و بخار اشباع خارج شده از مبدل‌های حرارتی بخش جابجایی آب-گاز مخلوط می‌شود تا جریان حاصل در سوپرهیتر فشار متوسط (IPS) سوپرهیت شده و وارد توربین فشار متوسط شود. این جریان از ۳۶ بار تا ۳ بار در توربین فشار متوسط افت فشار پیدا کرده و تولید برق می‌نماید.

سمت فشار بالا:

جریان خروجی از پمپ فشار بالا تا میزان ۱۳۵/۶ بار افزایش فشار پیدا کرده و سمت فشار متوسط را ترک می‌کند و در اکونومایزر فشار بالا (HPE) گرم شده و به مایع اشباع تبدیل می‌شود. این جریان وارد یک جداکننده می‌شود تا قسمتی از آن جهت خنک‌سازی گاز سنتز به بخش جابجایی آب-گاز تغذیه شود. بخش دیگر وارد بویلر فشار بالا شده (HPB) و به بخار اشباع تبدیل می‌شود، جریان حاصل با جریان بخار اشباع خروجی از بخش جابجایی آب-گاز مخلوط شده و از یک سری مبدل حرارتی شامل دو سوپرهیتر عبور کرده و سوپرهیت می‌شود و سپس در توربین فشار بالا از ۱۳۵/۶ بار تا ۳۶ بار افت فشار پیدا کرده و تولید برق می‌نماید.

بخش پیش گرمایش:

جریان خروجی از توربین گاز در ابتدا جهت پیش گرمایش سه جریان ذکر شده در بخش‌های قبل استفاده می‌شود. این امر موجب کاهش دمای این جریان شده و به منظور جبران این کاهش دما میزان ۲ kg/s گاز طبیعی در مجرای مشعل استفاده می‌شود. بدین ترتیب دمای جریان به ۵۷۱ درجه رسیده (G - ۰۰) و به منظور گرم کردن و سوپرهیت کردن آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱۰ شمایی از کل فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. نمای کل فرآیند تولید یکپارچه سیکل ترکیبی

نتایج و بحث

فرضیات در نظر گرفته شده در این فرآیند در جدول ۳ گردآوری شده است. گاز طبیعی عرضه شده در فشار ۳۷ بار و دمای ۱۰ بوده و به همراه ترکیبات هوای محیط استفاده شده در فرآیند در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات بخش هوا و توربین گاز

توربین گاز	
۱۳۸۳	دمای ورودی به توربین گاز (TIT) (°C)
۱۹۰	دمای سوخت ورودی به محفظه احتراق توربین (°C)
چرخه بخار	
نوع چرخه بخار	
۳۶ / ۱۳۵/۶	دوفشاره همراه با پیش گرمایش سطوح فشار HP/IP (بار)
۵۷۲	دمای ورود گاز به مولد بخار با یاب حرارتی پس از پیش گرمایش (°C)
۲ بار	فشار کندانسور (بار)
کمپرسور تقویت کننده هوا	
۱/۶۵	نسبت فشار
۰.۸۵	بازده ایزنتروپیک (%)
۹۹/۵	بازده مکانیکی (%)
فرآیند تولید گاز سنتز	
۵۰۰	دمای گاز طبیعی ورودی به راکتور ATR (°C)
۵۰۰	دمای هوای ورودی به راکتور ATR (°C)
۹۵۰	دمای گاز خروجی از راکتور ATR (°C)
۳۵۵	دمای ورود به راکتور HTS (°C)
۲۱۲	دمای ورود به راکتور LTS (°C)
جذب دی اکسید کربن	
۰/۹۸	میزان جذب دی اکسید کربن (%)
۲۷	دمای مونواتانول آمین ورودی (°C)
متراکم سازی دی اکسید کربن	
۴	تعداد مراحل متراکم سازی
۹۹/۵	بازده مکانیکی (%)
۸۵	فشار خروجی کمپرسور (بار)
۰.۷	بازده پمپ (%)
۱۵۰	فشار خروجی پمپ (بار)

با توجه به آمار تفصیلی برق ایران، ترکیب انواع نیروگاه‌های کشور که با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند در پایان سال ۸۹ به شرح زیر بوده است.

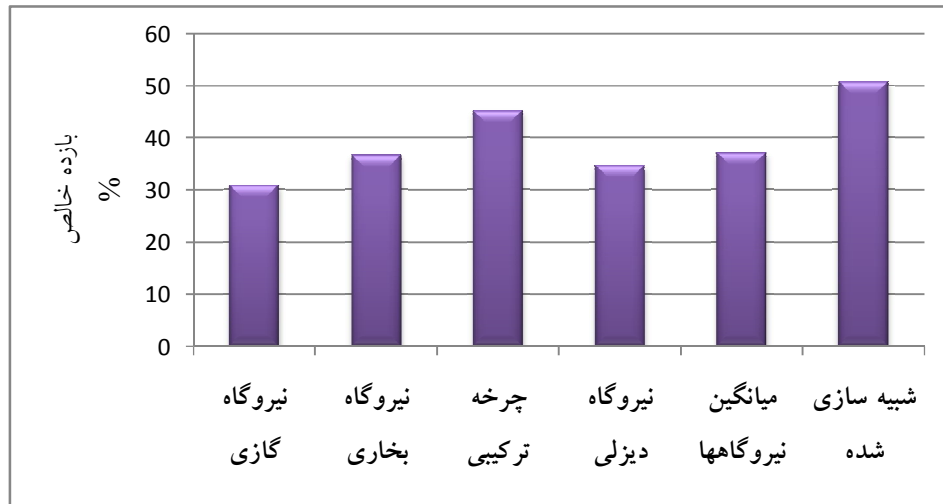
در حال حاضر در بین نیروگاه‌های کشور، نیروگاه‌های چرخه ترکیبی بالاترین راندمان را دارا هستند که متوسط آن ۴۵.۵٪ است [۶]. راندمان نیروگاه شبیه سازی شده میزان ۵/۳٪ بالاتر از این مقدار است که این مقدار نیز قابل افزایش است و با توجه به جلوگیری از ورود دی اکسید کربن به هوا در نیروگاه شبیه سازی شده می‌تواند در دسته فن آوری‌های دوست دار محیط زیست قرار بگیرد.

جدول ۴. خلاصه وضعیت بخش تولید صنعت برق در سال ۱۳۹۱

سال ۱۳۸۹	سال ۱۳۹۰	سال ۱۳۹۱					شرح
		جمع کل	شبکه سراسری				
			جمع شبکه	صنایع بزرگ	بخش خصوصی	وزارت نیرو	
۳۶/۴	۳۶/۹	۳۶/۷	۳۶/۷	۳۵/۲	۴۰/۱	۳۶/۸	بخاری
۳۰/۱	۳۰/۶	۳۱/۰	۳۱/۰	۳۳/۹	۳۲/۰	۲۹/۷	گازی
۴۴/۷	۴۴/۰	۴۵/۳	۴۵/۳	-	۳۲/۵	۴۵/۵	چرخه ترکیبی
۳۳/۷	۳۵/۴	۳۴/۷	۳۱/۲	-	-	۳۱/۲	دیزلی
۳۶/۶	۳۶/۹	۳۷/۲	۳۷/۲	۳۴/۲	۳۲/۲	۳۸/۱	کل حرارتی

راندمان نیروگاه های حرارتی

شکل ۱۱ به صورت مقایسه‌ای راندمان نیروگاه‌های کشورمان و فرآیند شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند IRCC در این مقاله، میزان راندمان ۵۰/۸٪ بوده که ۶/۱٪ افزایش را نسبت به متوسط راندمان نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نشان می‌دهد. این مقدار افزایش راندمان برای نیروگاه‌ها بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه بازده خالص نیروگاه‌های کشور و فرآیند شبیه سازی شده

با توجه به موارد ذکر شده و نتایج حاصل از این شبیه سازی می‌توان گفت که فرآیند بررسی شده در این مقاله در صورت اجرا در کشورمان علاوه بر جلوگیری از افزایش آلودگی هوا، موجب افزایش بازده تولید برق خواهد شد. میزان افزایش راندمان این فرآیند نسبت به متوسط بازده خالص نیروگاه‌های چرخه ترکیبی کشور که بیش‌ترین بازده را دارند، حداقل ۵٪ است که این مقدار افزایش بازده برای تولید برق کشور بسیار بارز است.

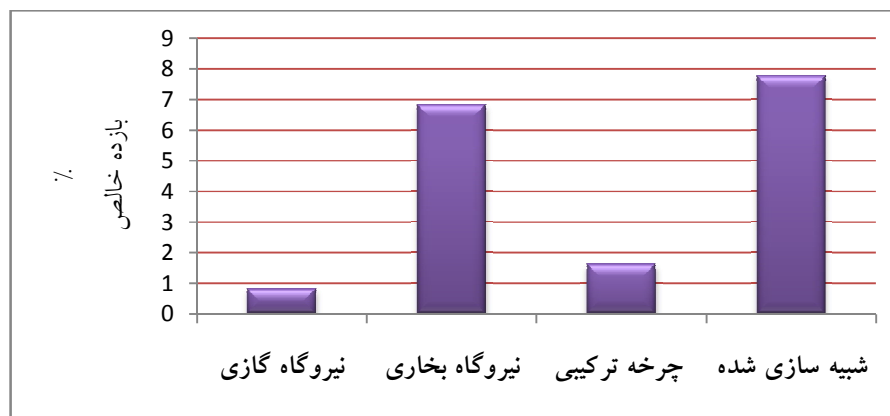
مصرف داخلی نیروگاه‌ها

قسمتی از تولید نیروگاه‌ها برای تأمین برق مورد نیاز تأسیسات اصلی و جانبی نیروگاه‌ها (مصرف داخلی) به مصرف می‌رسد و این مقدار در نیروگاه‌های مختلف متفاوت است. در سال ۱۳۸۹ مصرف داخلی نیروگاه‌های کشور ۸۰۸۳ میلیون کیلووات ساعت بوده است که ۳/۵ درصد از کل تولید برق کشور را شامل گردیده است [۴]. متوسط مصرف داخلی برای نیروگاه‌های بخاری ۶/۸ درصد، گازی ۰/۸ درصد و چرخه ترکیبی ۱/۶ درصد، از تولید ناویژه بوده است. به طوری که ملاحظه می‌شود نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و گازی مصرف داخلی کم‌تری دارند و در سال‌های اخیر با توسعه این قبیل نیروگاه‌ها به تدریج از میزان مصرف داخلی نیروگاه‌ها کاسته شده است.

میزان مصرف داخلی نیروگاه مورد مطالعه همان‌طور که در جدول ۵ آمده است میزان ۷/۷۴٪ از تولید ناویژه را به خود اختصاص می‌دهد که این به دلیل افزایش تأسیسات اصلی مانند رآکتورها، مبدل‌های حرارتی و بخش جذب دی اکسید کربن در این فرآیند نسبت به نیروگاه‌های دیگر است. در شکل ۱۲ میزان مصرف داخلی نیروگاه‌های کشور و واحد شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۵. میزان مصرف داخلی نیروگاه‌ها

درصد کاهش بازده LHV %		میزان برق مصرفی (MW)		واحد مصرف برق
مرجع	شبیه‌سازی شده [۱۱]	مرجع [۱۱]	شبیه‌سازی شده	
۰/۷	۰/۶	۶/۴	۶/۱	متراکم سازی هوا
۱/۸	۱/۸	۱۶/۸	۱۶/۷	متراکم سازی دی اکسید کربن
۰/۲	۰/۰۷	۱/۹	۰/۷	پمپ جذب دی اکسید کربن
۱	۱	۹/۶	۹/۶	پیش گرمایش
۳/۱	۲/۳	۲۸/۸	۲۱/۲	خروج بخار
۰/۹	۱/۱۶	۸/۳	۱۰/۶۶	بهبودی
۰/۶	۰/۶۱	۵/۴	۵/۶۴	جابجایی آب-گاز
۸/۳	۷/۷۴	۷۷/۲	۷۰/۶	جمع کل برق مصرفی
۴۱/۲	۵۰/۸	۳۵۷/۸	۴۶۳/۷	نتیجه (برق خالص تولیدی)



شکل ۱۲. نمودار مقایسه مصرف داخلی نیروگاه‌ها

با توجه به موارد ذکر شده و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی می‌توان گفت که فرآیند بررسی شده در این تحقیق در صورت اجرا در کشورمان علاوه بر جلوگیری از افزایش آلودگی هوا، موجب افزایش بازده تولید برق خواهد شد. میزان افزایش راندمان این فرآیند نسبت به متوسط بازده خالص نیروگاه‌های چرخه ترکیبی

کشور که بیشترین بازده را دارند، حداقل ۵٪ بیش تر است که این مقدار افزایش بازده برای تولید برق کشور بسیار با ارزش است. استفاده از تکنولوژی اضافه کردن آب به ورودی توربین گاز موجب افزایش قابل توجهی در بازده توربین گاز شده و این باعث افزایش راندمان فرآیند شبیه سازی شده نسبت به واحد مرجع می شود. عمده تفاوت های واحد شبیه سازی شده و واحد مرجع، استفاده از نرم افزار اسپن پلاس به جای استفاده از نرم افزار ترموفلو در بخش تولید برق، میزان بخار آب خروجی کم تر از بخش مولد بخار بازیاب حرارتی نسبت به واحد مرجع، استخراج آب موجود در گاز دودکش و استفاده از آن در ورودی توربین گاز واحد شبیه سازی شده است.

نتیجه گیری

برق تولیدی در این فرآیند از توربین گاز و توربین های بخار حاصل می شود. در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند رفورمینگ یکپارچه سیکل ترکیبی می پردازیم. در جدول ۶ میزان برق تولیدی از این فرآیند در مراحل مختلف عملیاتی نمایش داده شده است. در شبیه سازی انجام شده در این پژوهش جهت افزایش بازده توربین گاز از آب استفاده شده که این آب از گاز دودکش استخراج شده است، به همین دلیل میزان بازده توربین گاز در این سیستم بالاتر از شبیه سازی مرجع است. اما میزان برق تولید شده در بخش HRSG کم تر از واحد مرجع بوده است و این به دلیل کاهش فشار و همچنین میزان آب استفاده شده در این سیستم است.

کمپرسور بیشترین میزان مصرف برق در این فرآیند را دارد. ۴۴٪ از برق تولیدی توسط توربین گاز توسط کمپرسور آن مصرف می شود که اگر بتوان میزان هوای ورودی به کمپرسور را کم تر در نظر گرفت، میزان بازده توربین گاز افزایش خواهد یافت.

میزان جذب دی اکسید کربن توسط سیستم مونواتانول آمین ۹۸٪ است که به دلیل سوخت گاز طبیعی به عنوان سوخت پشتیبان در مجرای مشعل در دو قسمت از بخش HRSG کاهش و به مقدار ۸۵٪ خواهد رسید که این مقدار به میزان گاز طبیعی مورد نیاز در مجرای مشعل بستگی دارد.

مصرف آب در نیروگاهها بسیار حائز اهمیت است. در این شبیه سازی سعی شده است که میزان مصرف آب را به حداقل رساند که با توجه به این امر میزان برق تولیدی از توربین های بخار کاهش خواهد یافت. از طرفی در گاز دودکش خروجی از بخش مولد بخار بازیاب حرارتی مقدار قابل توجهی آب وجود دارد که به منظور افزایش بازده و جلوگیری از اتلاف این را جداسازی نموده و جهت افزایش بازده توربین گاز قسمتی از آن را به بخش احتراق توربین گاز وارد کرده ایم.

بدین ترتیب کاهش بازده در توربین های بخار از این طریق جبران شده و بازده واحد شبیه سازی شده نسبت به واحد مرجع به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. با این میزان خروجی ناخالص برق بازده واحد مقدار ۵۸.۵٪ دست خواهیم یافت که با کاهش برق مصرفی داخلی نیروگاه راندمان به حدود ۵۱٪ خواهد رسید. با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند رفورمینگ یکپارچه سیکل ترکیبی در این مطالعه، میزان

راندمان ۵۰/۸٪ بوده که ۶/۱٪ افزایش را نسبت به متوسط راندمان نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نشان می‌دهد. این مقدار افزایش راندمان برای نیروگاه‌ها بسیار حائز اهمیت است.

جدول ۶. میزان برق کل حاصل از فرآیند

میزان تولید برق (MW)		منبع تولید برق
واحد مرجع [۱۱]	شبیه سازی شده	
۹۱۲	۹۱۲	میزان توان گاز طبیعی ورودی (LHV)
۲۵۳.۵	۳۷۴.۶	میزان برق حاصل از توربین گاز
۱۹۹.۵	۴۷.۴	میزان برق حاصل از توربین های بخار LP و IP ،HP
	۸۲.۴	
	۲۹.۹	
۴۵۳	۵۳۴.۳	میزان کل برق ناخالص حاصل از فرآیند

فهرست علائم و نشانه ها

ATR	Auto Thermal Reforming
CHP	Combined Heat & Power
GTL	Gas To Liquid
HPS	High Pressure Steam
HPE	High Pressure Economizer
HRSG	Heat Recovery Steam Generation
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IRCC	Integrated Reforming Combined Cycle
LPE	Low Pressure Economizer
LP	Low Pressure
LTS	Low Temperature Shift (Reactor
LHV	Low Heating Value
MEA	Mono Ethanol Amine
NGCC	Natural Gas Combined Cycle
TSA	Temperature Swing Adsorption
TIT	Turbine Inlet Temperature

منابع

1. Abu Zahra, R.M., 2009. Carbon dioxide capture from flue gas: Development and evaluation of existing and novel process concepts.
2. Amann, J.-M., Kanniche, M., Bouallou, C., 2009. Reforming natural gas for CO₂ pre-combustion capture in combined cycle power plant. Clean Technologies and Environmental Policy 11 (1), 67-76.
3. Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L., 2005. Using hydrogen as gas turbine fuel. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 127 (1), 73-80.



4. Chapel, D. G., Mariz, C. L., 1999. Recovery of CO₂ from flue gases: commercial trends. In: The Canadian Society of Chemical Engineers annual meeting. Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
 5. Hoffmann, S., Bartlett, M., Finkenrath, M., Evulet, A., Ursin, T. P., 2009. Performance and cost analysis of advanced gas turbine cycles with precombustion CO₂ capture. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 131 (2), 021701 (7 pp.).
 6. International Energy Agency, 2008. *World Energy Outlook 2008*.
 7. Olof Nord, L. 2010. Pre- combustion CO₂ capture: Analysis of integrated reforming combined cycle. PhD dissertation. Norwegian University of science and technology. Department of Energy and Process Engineering.
 8. Todd, D. M., Battista, Robert, A., 2000. Demonstrated applicability of hydrogen fuel for gas turbines. In: *Gasification 4 the Future*. Noordwijk, Netherlands.
۱. جعفری نصر، محمد رضا. امیرعباس کاظم زاده فریزهندی. ۱۳۸۳. یکپارچه کردن انرژی در فرآیندهای نفت، گاز و پتروشیمی. پژوهشگاه صنعت نفت.
 ۲. جعفری نصر، محمد رضا. مینا کوخایی. ۱۳۹۲. بررسی و شبیه سازی گازسازی یکپارچه سیکلهای ترکیبی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات.
 ۳. رضایی، مهرا. علوی، سید مهدی. طائب، عباس. صاحبدفتر، سعید. ۱۳۸۳. مقایسه روشهای ترکیبی تولید گاز سنتز. نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران.
 ۴. سودمنداصلی، علیرضا. فاتحی فر، اسماعیل. ۱۳۸۳. بررسی روشهای مختلف جذب دی اکسید کربن از گازهای خروجی نیروگاهها، انتخاب روش بهینه جذب و طراحی واحدی برای تولید CO₂ مورد نیاز صنایع نوشابه سازی. نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران.