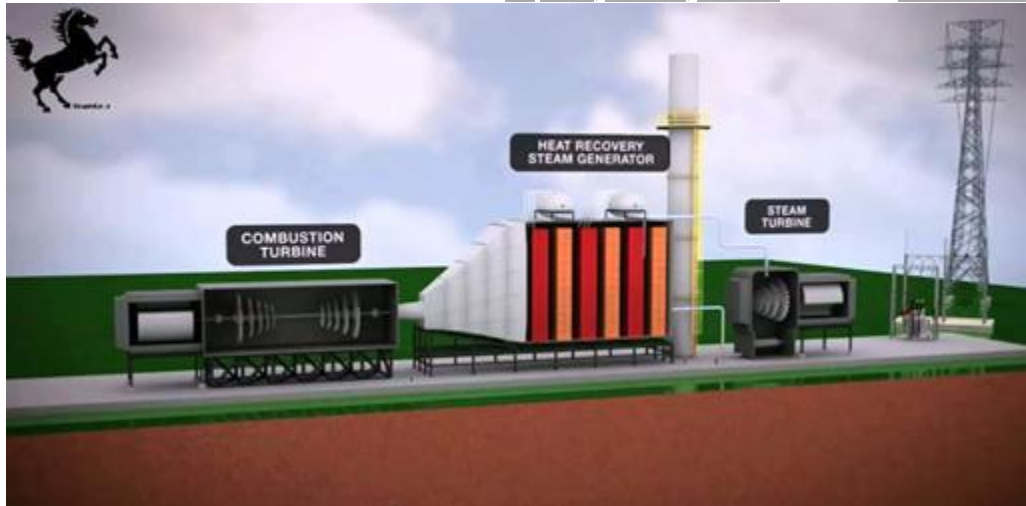


# نیروگاه سیکل ترکیبی چیست

مهندس سیاه تیری ۱۳۹۳/۱۲/۲۲ تمام مطالب خواندنی ها فیلم ۴۶ نظر



نیروگاه چرخه ترکیبی نیروگاهی است که شامل تعدادی توربین گاز و توربین بخار می‌شود. در این نوع نیروگاه، با استفاده از بویلر بازیاب، از حرارت موجود در گازهای خروجی از توربین‌های گاز، برای تولید بخار آب مورد نیاز در توربین‌های بخار استفاده می‌شود. اگر توربین گاز به صورت سیکل ترکیبی نباشد، گازهای خروجی آن، که می‌توانند تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد دما داشته باشند، مستقیماً وارد هوا شده و انرژی باقی‌مانده در آن هدر می‌رود. در حالی که در نیروگاه سیکل ترکیبی، از این انرژی استفاده شده و بویلر توربین بخار بدون نیاز به سوخت، بخار آب تولید می‌کند. بنابراین، با استفاده از این روش، راندمان سیکل افزایش می‌یابد.

قبل تر نیز به بررسی کامل [نیروگاه هسته ای](#) و [نیروگاه انبساطی](#) پرداختیم که توصیه می کنیم این دو نیروگاه را نیز مطالعه بفرمایید.

به صورت تئوریک، انرژی قابل بازیابی از آگروز توربین‌های گازی حدود نصف انرژی تولید شده توسط خود توربین گاز است. بنابراین، توان توربین بخار حدود نصف توربین گاز خواهد بود. در برخی از طراحی‌ها، دو توربین گاز، انرژی مورد نیاز برای یک توربین بخار را ایجاد می‌کنند و در نتیجه، توان تولیدی توربین‌های بخار در حدود توربین‌های گاز می‌شود.

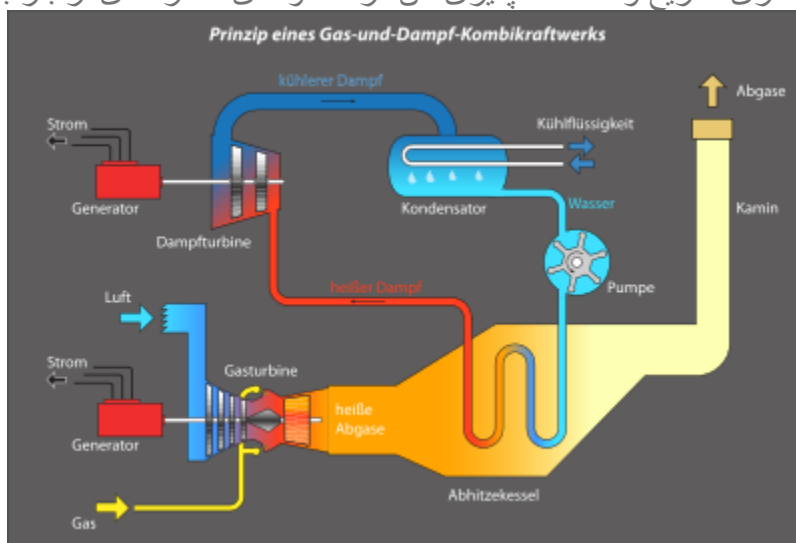


نیروگاه های سیکل ترکیبی ( Combined cycle power plant) راه حل بسیار کارآمد، انعطاف پذیر، قابل اعتماد، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای تولید برق است.

نیروگاه سیکل ترکیبی در واقع ترکیبی از توربین بخار و توربین گازی می باشد به نحوی که ژنراتور توربین گازی برق را تولید می کند، در عین حال انرژی حرارتی تلف شده از توربین گاز ( توسط محصولات احتراق) برای تولید بخار مورد نیاز توربین بخار مورد استفاده قرار می گیرد و به این طریق برق اضافی تولید می شود. با ترکیب کردن این دو سیکل بهره بری از نیروگاه افزایش پیدا می کند. بازده الکتریکی از یک چرخه ساده کارخانه نیروگاه برق بدون استفاده از اتلاف گرما به طور معمول راندمانی بین ۲۵ تا ۴۰ درصد دارد، در حالی که همان نیروگاه با سیکل ترکیبی راندمان الکتریکی حدود ۶۰ درصد را دارد.

همانطور که گفته شد این نیروگاه ها از ترکیب توربین های بخار و گاز ساخته می شوند و بسته به نوع توربین ها ، دیگ های بازیافت گرما ، و دستگاه های بازیابی انواع متعددی دارند.

با به کار گیری توربین های گازی در چرخه های ترکیبی می توان پایین بودن بازده آن را بر طرف کرد و در نتیجه آن را برای تامین بار پایه به کار گرفت، در عین حال از مزایای دیگر آن نیز مانند راه اندازی سریع و انعطاف پذیری آن در محدوده ی گسترده ای از بار بهره مند شد.

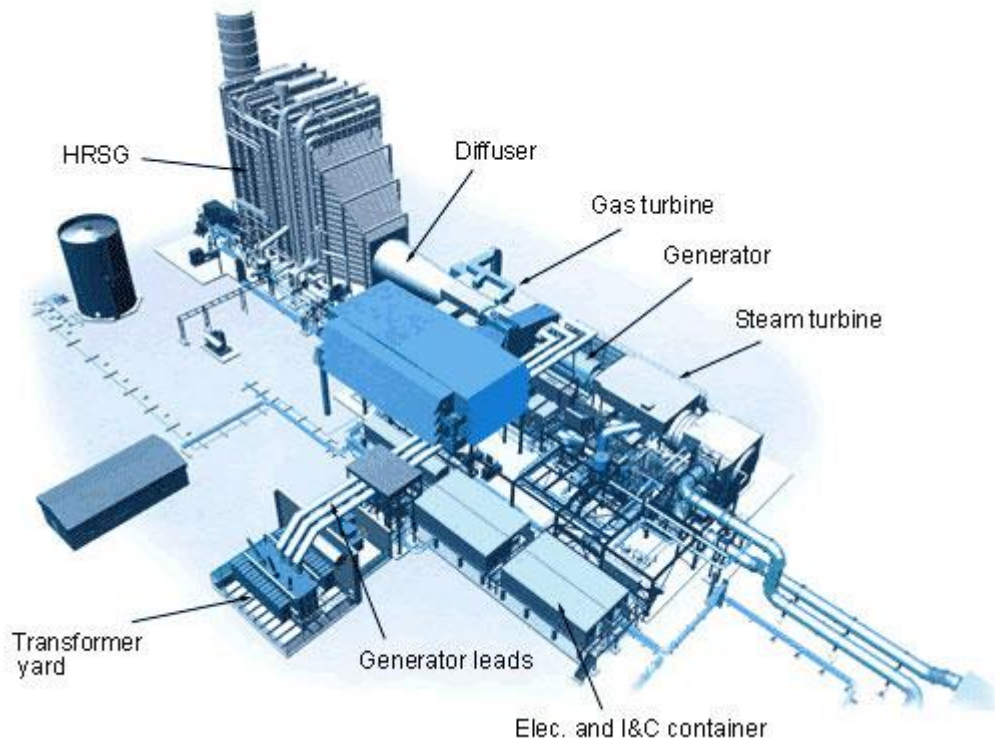


## تاریخچه نیروگاه سیکل ترکیبی

ایده سیکل ترکیبی برای بهبود بازده سیکل ساده برایتون، از طریق استفاده از حرارت گاز های خروجی توربین گازی، پیشنهاد شد.

این امر به وسیله بازیافت گرما مورد آزمایش قرار گرفت. بازیافت گرما توانست انرژی که از خروجی توربین گازی هدر می رفت را از ۷۰ به ۶۰ درصد انرژی داده شده، برساند. مبادله کن گرما امکان افزایش توان خروجی را ندارد و فقط راندمان را افزایش می دهد. از آنجایی که مبادله کن گرما افت فشار زیادی را به سیکل وارد می کند، استفاده از آن باعث کاهش نسبت فشار توربین و در نتیجه کاهش توان خالص خروجی می شود. با توجه به توان بیشینه چرخه های ساده، از آنها در جاهایی بهره می گیرند که راندمان خروجی از اهمیت کمتری برخوردار است. در حالی که چرخه های بازیابی را در مواردی مورد استفاده قرار می دهند که راندمان بالا نیاز است. در نتیجه توان خروجی سیکل بازیاب در حدود ۱۱ تا ۱۴ درصد پایین تر از سیکل ساده است، که در یک ارزیابی کلی به این نتیجه می رسیم که بازده نیروگاه توربین گازی همراه با بازیاب روش پر هزینه ای است. از این رو باید به دنبال روشی بود که از طریق آن بتوان به هر دو نیاز، یعنی راندمان و توان بالا دست یافت. راه حلی که پیشنهاد شد در واقع بهره گیری از انرژی حرارتی بسیار بالای گاز های خروجی توربین گازی برای تولید بخار مورد نیاز نیروگاه بخار بود. توربین گازی دارای گازهایی با دمای حدود ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی گراد، و توربین گازی ماشینی با دمای حدود ۵۳۰ تا ۶۴۰ درجه سانتی گراد می باشد، که با ترکیب همزمان توربین گازی در طرف گرم و توربین

بخار در طرف سرد را نیروگاه سیکل ترکیبی می گویند. اولین نیروگاه سیکل ترکیبی در ۱۹۵۰ ساخته شد. از آن به بعد تعداد نیروگاه های سیکل ترکیبی به خصوص در دهه ۱۹۷۰ به سرعت افزایش یافت.



## انواع نیروگاه سیکل ترکیبی

نیروگاه های سیکل ترکیبی از نظر نوع توربین ها و بازیاب ها و وجود مشعل به دسته های زیر تقسیم می شوند:

۱. نیروگاه های سیکل ترکیبی با مشعل
۲. نیروگاه های سیکل ترکیبی بدون مشعل
۳. نیروگاه های سیکل ترکیبی با دیگ بازیافت گرما مجهز به بازیابی و یا گرمایش آب تغذیه
۴. نیروگاه های سیکل ترکیبی با دیگ بازیافت گرما با فشار بخار چند گانه
۵. نیروگاه های سیکل ترکیبی با سیکل بسته توربین گازی با گرمایش آب تغذیه در چرخه بخار

در نوع اول از نیروگاه ها یک مشعل در داخل بویلر قرار می دهند و بیشتر در نیروگاه هایی مورد استفاده قرار می گیرد که قرار باشد بخش بخار آن به طور دائم کار کند، که در این صورت نباید وابستگی به توربین گازی داشته باشد. در نوع دوم از این نیروگاه ها از گاز های داغی که به عنوان محصولات احتراقی از توربین گازی خارج می شود مورد استفاده قرار می گیرد. این دود خروجی دارای حجم بالا و دمایی حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد است و به داخل بویلر برای تبدیل آب به بخار ارسال می شود تا از انرژی بخار برای به حرکت در آوردن ژنراتور مورد استفاده قرار بگیرد. کاربرد گونه های مختلف سیکل های ترکیبی متفاوت است. از نیروگاه سیکل ترکیبی بدون مشعل بیشتر برای تامین بار پایه و میانی مورد استفاده قرار می گیرد. در نوع سوم از این نیروگاه ها در چرخه ترکیبی، گاز های خروجی یک چرخه ساده

توربین گازی که شامل کمپرسور هوا (AC)، اتاق احتراق (CC) و توربین گازی (GT) است، وارد دیگ بازیافت گرما (HRB) می شود و در آنجا برای تولید بخار فوق گرم مورد استفاده قرار می گیرد. در چرخه های ترکیبی که قدرت پایینی دارند توان توربین بخار در حدود ۵۰ درصد کمتر از توربین گازی است. در نوع چهارم این نیروگاه ها که بخار با فشار چندگانه تولید می شود، دمای گاز های خروجی دیگ بازیافت گرما کاهش می یابد و به این ترتیب بازده نیروگاه به طور کلی افزایش پیدا می کند. ساده ترین نوع این چرخه، چرخه با فشار دوگانه است، هر چند که چرخه با فشار سه گانه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال در یک سیکل با فشار دوگانه، دیگ بازیافت گرما دارای دو مدار برای تولید بخار است. مدار اول مدار فشار بالاست که بخار تولید شده در آن از مجرای ورودی توربین وارد آن می شود، و مدار دوم مدار فشار پایین است که بخار تولید شده در آن از طبقات با فشار پایین تر وارد توربین می شود. در یک چرخه ترکیبی پیشنهادی با فشار سه گانه، بخار دیگری با فشاری بین فشارهای ورودی به دو توربین بخار تولید می شود. این بخار به اتاق احتراق توربین گازی تزریق می شود تا میزان گسیل اکسید های نیتروژن تا حد استاندارد تعیین شده، کاهش بیابد. در صورتی که از این روش استفاده شود، مقداری آب تلف خواهد شد که به طور پیوسته باید آن را جبران کرد.

### نگاهی دقیق تر به سیکل ترکیبی

سیکل ترکیبی خصوصیت موتور یا نیروگاه تولید کننده برق است که از بیش از یک سیکل ترمودینامیک در آن استفاده شده است. موتورهای حرارتی فقط می توانند بخشی از انرژی را که سوخت آنها تولید می کنند مصرف کنند (معمولاً کمتر از ۵۰ درصد) حرارت باقیمانده حاصل از احتراق سوخت عموماً هدر می رود. ترکیب تعداد ۲ سیکل یا بیشتر مانند سیکل برایتون (Brayton) و سیکل رانکین (Rankine) باعث راندمان بیشتر خواهد شد.

در نیروگاه سیکل ترکیبی (CCPP) یا توربین گازی سیکل ترکیبی (CCGT)، ژنراتور توربین گازی برق تولید می کند و حرارت که معمولاً هدر می رود برای تولید بخار آب و در نتیجه تولید برق اضافی از طریق توربین بخار استفاده می شود. مرحله آخر راندمان تولید برق را افزایش می دهد. اغلب نیروگاههای گازی جدید در آمریکای شمالی و اروپا از این نوع هستند. در نیروگاه حرارتی، حرارت با درجه بالا به عنوان ورودی نیروگاه معمولاً در اثر احتراق سوخت به برق تبدیل می شود، اختلاف درجه حرارت بین ورودی و خروجی بایستی تا حد امکان زیاد باشد. این شرایط در اثر ترکیب سیکل های ترمودینامیک بخار و گاز به

وجود می‌آید. این روش برای نیروی رانش زیرآب (توربین) گازی و (توربین) بخار ترکیبی (COGAS) نامیده می‌شود.

بازیافت گرما، انرژی هدر رفته از دودکش را از ۷۰ به ۶۰ درصد انرژی داده شده می‌رساند. استفاده از مبادله کن گرما منحصراً موجب افزایش بازده می‌شود و توان خروجی را افزایش نمی‌دهد. در حقیقت، به دلیل افت فشار بیشتری که مبادله کن گرما به چرخه تحمیل می‌کند، استفاده از مبادله کن موجب کاهش نسبت فشار توربین و در نتیجه کاهش توان خالص خروجی به مقدار چند درصد می‌شود. صرف نظر از این کاهش اندک در توان خروجی، استفاده از مبادله کن گرما به دلیل سطح تبادل گرمایی زیاد آن و لوله‌های بزرگ هوا و گاز در آن سبب گرانتز شدن نیروگاه می‌شود. اثر دیگری که به کارگیری مبادله کن گرما می‌گذارد این است که نسبت فشار بهینه‌ای که منجر به بیشینه شدن بازده می‌شود به مقادیر کوچکتر میل می‌کند و این امر، توان را کاهش می‌دهد.

چرخه‌های ساده در نزدیکی توان بیشینه کار می‌کنند زیرا در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرند که بازده در آنها از اولویت عمده برخوردار نیست. در مقابل، استفاده از چرخه‌های بازیابی تنها هنگامی منطقی است که در نزدیکی بازده بیشینه عمل کنند. از این رو توان خروجی چرخه بازیابی نسبت به توان چرخه ساده به مقدار بیشتری در حدود ۱۰ تا ۱۴ درصد کمتر است.

همانطور که گفته شده بالا بردن بازده نیروگاه توربین گازی به وسیله بازیابی روش پرهزینه‌ای است. بنابراین باید به دنبال روشی بود که با به کارگیری آن بتوان هر دو مقدار بازده و توان را افزایش داد. راه حلی که برای این منظور پیدا شده است، استفاده از انرژی بسیار زیاد گازهای خروجی توربین برای تولید بخار جهت استفاده در یک نیروگاه بخار است. این یک روش طبیعی است چرا که توربین گاز یک ماشین با دمایی نسبتاً بالا (۱۱۰۰ تا) و توربین بخار یک ماشین با دمایی نسبتاً پایین (۵۴۰ تا) است. این کارکرد توأم توربین گازی در طرف گرم و توربین بخار در طرف سرد را نیروگاه چرخه ترکیبی می‌نامند.

چرخه‌های ترکیبی علاوه بر داشتن بازده و توان بالا، از مزایای دیگری نیز مانند انعطاف‌پذیری، راه‌انداز سریع، مناسب بودن برای تأمین بار پایه و عملکرد دوره‌ای و بازده بالا در محدود گسترده‌ای از تغییرات بار برخوردار است. در نیروگاه‌های ترکیبی امکان استفاده از زغال سنگ، سوخت‌های سنتزی و انواع دیگر سوختها وجود دارد

عیب بارز چرخه ترکیبی، پیچیدگی آن است، زیرا اساساً در چرخه ترکیبی از دو نوع تکنولوژی متفاوت استفاده می‌شود.

ایده چرخ ترکیبی يك ایده تازه نیست و در اوایل این قرن پیشنهاد شد. اما در سال ۱۹۵۰ بود که اولین نیروگاه ترکیبی ساخته شد. بعد از آن تاریخ تعداد نیروگاههای ترکیبی نصف شده، به ویژه در دهه ۱۹۷۰، به سرعت افزایش یافت، تخمین زده می‌شود که تا انتهای دهه ۱۹۷۰ در حدود ۱۰۰ واحد نیروگاه ترکیبی با ظرفیت که MW 150000 در سراسر جهان ساخته شود.

چرخه‌های ترکیبی به صورت‌های متعددی پیشنهاد شده‌اند که مهمترین آنها عبارتند از:

(۱) دیگ بازیافت گرما با احتراق اضافی یا بدون آن

(۲) دیگ بازیافت گرما مجهز به بازیابی و یا گرمایش آب تغذیه

(۳) دیگ بازیافت گرما با فشار بخارچندگانه

(۴) چرخه بسته توربین گازی با گرمایش آب تغذیه در چرخه بخار

### طراحی نیروگاه سیکل ترکیبی

در نیروگاه‌های حرارتی آب به عنوان واسطه فعال عمل می‌کند. بخار آب با فشار بالا به قطعات محکم و بزرگ نیاز دارد. همچنین بخار آب با فشار بالا به آلیاژهای گران‌قیمت احتیاج دارد که از فلزاتی مانند نیکل یا کبالت ساخته شده بجای اینکه از فولاد ارزان‌قیمت ساخته شود. این آلیاژها درجه حرارت بخار آب را تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد محدود می‌کنند در حالیکه درجه حرارت پائین دستگاه بخار در نقطه جوش تنظیم می‌شود. با وجود این شرایط، سیستم بخار بین ۳۵ تا ۴۲ درصد راندمان بیشتری خواهد داشت.

یک سیکل توربین گازی باز دارای کمپرسور، سیستم احتراق و توربین است. در توربین‌های گازی مقدار فلزی که باید حرارت زیاد و فشار بالا را تحمل کند قابل توجه نیست و می‌توان از مواد ارزان‌قیمت‌تر استفاده کرد. در این نوع سیکل حرارت ورودی به توربین (حرارت احتراق) نسبتاً زیاد است (۹۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد). حرارت خروجی گاز دودکش نیز زیاد است (۴۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد). بنابراین این حرارت برای تأمین گرمای سیکل دوم که از بخار آب به عنوان سیال فعال (سیکل رنکاین) استفاده می‌کند به اندازه کافی زیاد است.

در نیروگاه سیکل ترکیبی، حرارت گاز خروجی توربین برای تولید بخار آب با عبور از طریق ژنراتور بخار بازیافت حرارت (HRSG) با حرارت بخار آب بین ۴۲۰ و ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. کندانسور سیکل رنکاین معمولاً به وسیله آب دریاچه، رودخانه، دریا یا برج‌های خنک‌کننده خنک می‌شود. این درجه حرارت می‌تواند به اندازه ۱۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

## راندمان نیروگاه‌های دارای توربین گازی سیکل ترکیبی

با ترکیب سیکل‌های گازی و بخار به درجه حرارت‌های زیاد ورودی و درجه حرارت کم خروجی می‌توان دست یافت. به دلیل اینکه این سیکل‌ها توسط یک منبع سوخت تغذیه می‌شوند راندمان آنها افزایش می‌یابد. بنابراین یک نیروگاه سیکل ترکیبی دارای یک سیکل ترمودینامیک است که بین درجه حرارت احتراق بالایی توربین گازی و درجه حرارت تلف شده از کندانسورهای سیکل بخار عمل می‌کند. در صورتی که نیروگاه سیکل ترکیبی فقط برق تولید کند، راندمان آن تا ۶۰ درصد خواهد رسید و در صورتی که تولید برق همراه با مصرف حرارت باشد، راندمان آن تا ۸۵ درصد افزایش خواهد یافت.

## احتراق تکمیلی و خنک‌کردن تیغه‌های توربین

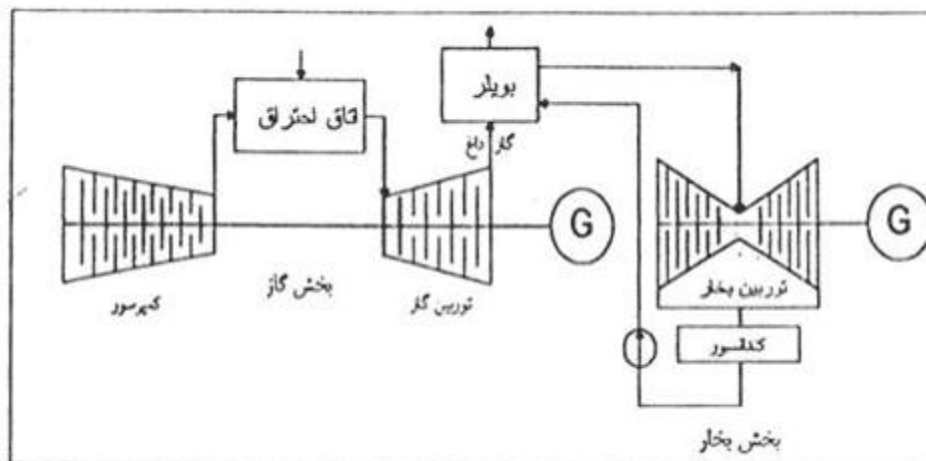
به منظور افزایش مقدار بخار آب یا درجه حرارت بخار آب تولید شده ژنراتور بخار بازیافت حرارت را با احتراق تکمیلی بعد از توربین گازی می‌توان طراحی کرد. بدون احتراق تکمیلی راندمان سیکل ترکیبی بالاتر است. ولی احتراق تکمیلی به نیروگاه امکان پاسخ به نوسانات بار الکتریکی را خواهد داد. غالباً در طراحی توربین‌های گازی بخشی از جریان هوای فشرده از کنار مشعل می‌گذرد که برای خنک‌کردن تیغه‌های توربین استفاده می‌شود.

## سوخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی

نیروگاه‌های سیکل ترکیبی معمولاً از گاز طبیعی استفاده می‌کنند، اگرچه از سوخت‌های دیگری مانند گاز مصنوعی نیز در این نیروگاه‌ها استفاده می‌شود. سوخت‌های مکمل که در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی مصرف می‌شوند عبارتند از گاز طبیعی، ذغال‌سنگ و غیره. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی خورشیدی هم‌اکنون در الجزیره و مراکش در دست ساخت می‌باشد.

شکل زیر شمای عمومی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را نشان می‌دهد:



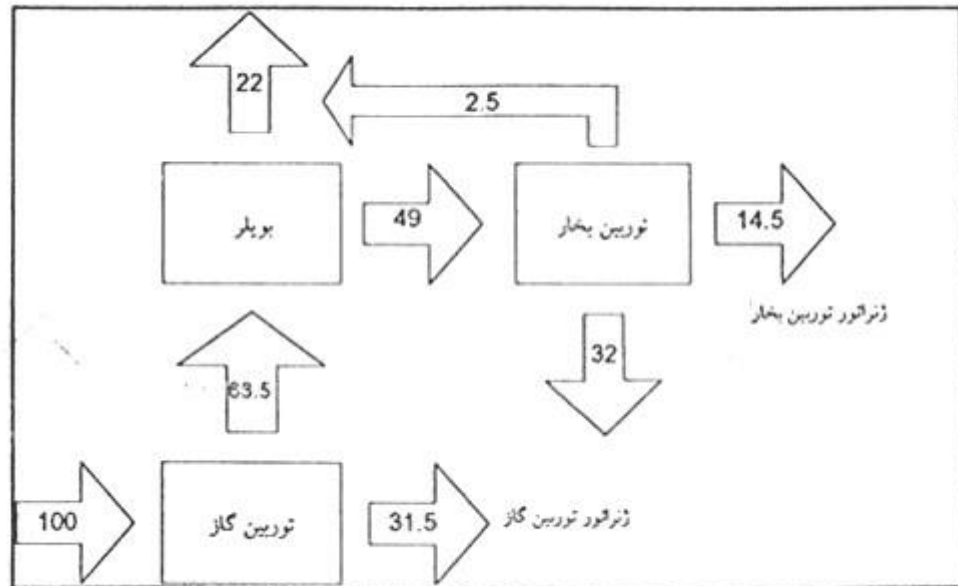


بر اساس نحوه استفاده از گاز خروجی ، نیروگاههای سیکل ترکیبی به سه دسته تقسیم بندی می شوند.

### - انیروگاههای سیکل ترکیبی بدون مشعل

در این نوع ، دود خروجی از اگزوز توربین گاز که حجم بالا و دمای زیادی ( دمای گاز خروجی در بار اسمی در حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد است ) دارد به بویلری هدایت می شود و به جای مشعل و سوخت در واحدهای بخاری ، جهت تولید حرارت به کار می رود. بخار تولید شده نیز توربین بخار را به چرخش در می آورد. این امر باعث بالا رفتن راندمان مجموعه نیروگاهی می گردد ، ضمن آنکه هزینه های سرمایه گذاری به ازای هر کیلو وات تا حد قابل ملاحظه ای کاهش پیدا می کند . این مجموعه برای تولید برق پایه استفاده می شود و کارایی آن در صورتی که فقط برای تولید برق به کار رود تا ۵۰ درصد هم بالا می رود. در مناطق سردسیر با بکارگیری توربین بخار با فشار خروجی زیاد (Back pressure) به جای کندانسور و برج خنک کن در تامین آب گرم و بخار مصرفی گرمایش مناطق شهری و صنعتی نیز استفاده می شود که در این صورت راندمان تا ۸۰ درصد هم افزایش می یابد.

در شکل زیر شمای حرارتی نیروگاههای سیکل ترکیبی بدون مشعل آورده شده است:

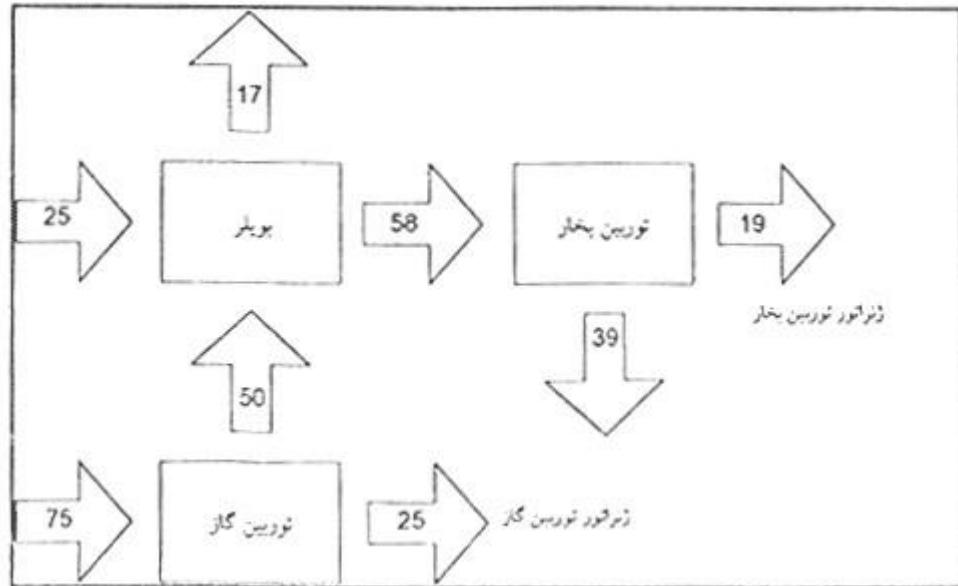


۲- نیروگاههای سیکل ترکیبی با سوخت اضافی ( مشعل )

در نیروگاههای سیکل ترکیبی بدون مشعل ، کارکرد بخش بخار وابستگی کامل به کارکرد توربین گاز دارد . در مواردی که نیاز به کارکرد دائمی بخش بخار وجود دارد با تعبیه مشعل در بویلر ، به گونه ای که در صورت توقف بخش گاز کارکرد قسمت بخار با اشکال مواجه نگردد ، عملکرد مستقل این دو بخش تامین می شود و بدین ترتیب ، این نوع نیروگاههای سیکل ترکیبی شکل گرفته اند.

این نوع سیکل ترکیبی عموماً به منظور بالا بردن قدرت و جلوگیری از نوسانات قدرت توربین بخار با تغییر بار توربین گاز به کار گرفته می شود . امکان کارکرد واحد بخار در نقطه کار مناسب تر با تعبیه مشعل ساده ، به کارگیری سوخت مناسب و استفاده از گاز داغ خروجی توربین گاز به عنوان هوای دم عملی است . قدرت واحد گاز و واحد بخار در حداکثر بار سیستم مساوی است . راندمان این نوع سیکل ترکیبی از واحد بخاری ساده بیشتر و از سیکل ترکیبی بدون مشعل کمتر می باشد . این نوع واحد ها غالباً در مواردی که علاوه بر تامین انرژی الکتریکی ، تامین آب مصرفی و یا بخار مورد نیاز واحدهای صنعتی نیز مد نظر باشد ، به کار می رود.

شکل زیر شمای حرارتی عمومی نیروگاههای سیکل ترکیبی با مشعل را نمایش می دهد:



### ۳- نیروگاههای سیکل ترکیبی جهت تامین هوای دم کوره بویلر

این نوع سیکل ترکیبی مشابهت زیادی با توربین بخار معمولی دارد با این تفاوت که در نیروگاه بخاری ساده از سیستم پیش گرم کن هوا و فن تامین کننده هوای دم که خود مصرف کننده انرژی است استفاده می گردد . لیکن در این گونه سیکل ترکیبی، سیستم گرمایش و فن دمنده هوای احتراق کوره را توربین گاز بر عهده گرفته است . بدین ترتیب راندمان واحد بخاری ساده با جانشین کردن سیستم تامین هوای دم با توربین گاز ، بطور نسبی بهبود می یابد

معمولاً این نوع سیکل ترکیبی در نیروگاههای بخاری بزرگ که سوخت آن ذغال سنگ و یا مازوت می باشد ، به کار می رود . قدرت تولیدی توربین گاز در این نوع سیکل حداکثر ۲۰ درصد قدرت تولید کل نیروگاه است.

بررسی بیشتر نیروگاههای سیکل ترکیبی

کاربرد گونه های مختلف سیکل های ترکیبی متفاوت می باشد ولی از آنجایی که سیکل های ترکیبی بدون مشعل در ارتباط با تولید بار پایه و میانی از اولویت بیشتری برخوردار است ( هزینه سرمایه گذاری کمتر ، مدت زمان نصب و راه اندازی کمتر ، راندمان بالاتر و قابلیت انعطاف بیشتر ) ، ذیلاً به تشریح این نوع چرخه ها می پردازیم

### سیکل های ترکیبی بدون مشعل

هدف اصلی در این نوع سیکل های ترکیبی ، استفاده مجدد از حرارت تلف شده آگزوز توربین گاز به منظور بالا بردن بهره وری سوخت می باشد. جهت حصول به هدف فوق و به حداقل رساندن هزینه ها ، سه رویه اجرایی در ابتدا مد نظر قرار گرفت و بر اساس آن سازندگان مختلف و تولید کنندگان انرژی الکتریکی نسبت به نصب هر پنج گونه سیکل اقدام نمودند که ذیلاً معرفی و تشریح می شوند:

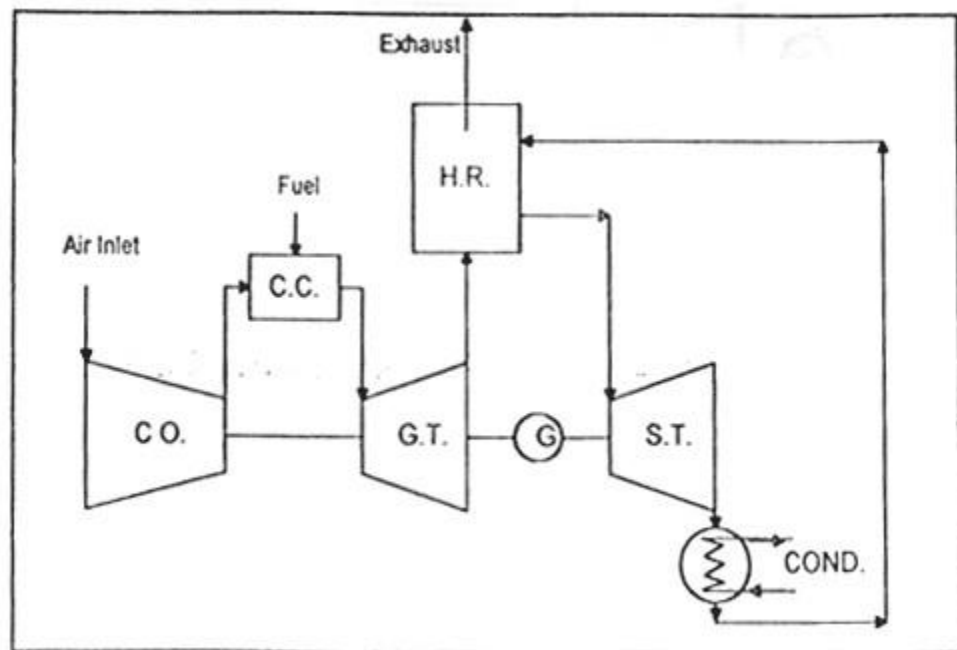
- چند توربین گاز ، چند بویلر و یک توربین بخار
- ۲ یک توربین گاز ، یک بویلر و یک توربین بخار

آرایش این گونه سیکل های ترکیبی بر پایه تقلیل هزینه سرمایه گذاری اولیه می باشد و حاصل تجارب اولیه در زمینه کاربرد چند توربین گاز با یک ژنراتور می باشد.

در این روش محور توربین گاز و محور توربین بخار و محور ژنراتور مشترک بوده و بصورت مجموعه واحد عمل می کند.

طرز کار کلی سیستم به این صورت است که گاز حاصل از احتراق توربین گاز ، قسمتی از انرژی مکانیکی خود را جهت به چرخش در آوردن توربین گاز مصرف می کند . گاز داغ خروجی از توربین گاز ، ضمن عبور از بویلر و تولید بخار وارد اتمسفر می گردد. بخار تولیدی در بویلر ، در توربین بخار منبسط شده و قسمتی دیگر از نیروی مکانیکی لازم جهت تولید انرژی الکتریکی در ژنراتور را تامین می کند.

طرح کلی این سیستم در شمای زیر منعکس می باشد:



در این روش به سبب اینکه غالباً ضریب قابلیت بهره برداری توربین گاز از بویلر و توربین بخار کمتر می باشد ، آگروز کمکی برای توربین گاز بکار نمی رود و قابلیت بهره برداری کل مجموعه معادل توربین گاز خواهد بود و انجام بازدیدها و تعمیرات بویلر و توربین بخار منطبق با برنامه تعمیرات توربین گاز می باشد . به سبب عدم کاربرد آگروز کمکی و نیز استفاده از ژنراتور مشترک ، هزینه سرمایه گذاری پایین است . ضمناً در مواردی که تامین آب گرم مصرفی و یا گرمایش شهری مورد نظر باشد معمولاً ژنراتور مستقل برای واحد بخار ملحوظ می شود.

بطور کلی محاسن و معایب این گونه سیستم ها به صورت زیر است:

#### **الف - محاسن:**

۱- هزینه سرمایه گذاری کمتر

۲- سادگی زیاد و معالاً تجهیزات بهره برداری کمتر

۳- هزینه تعمیرات و بهره برداری کمتر

۴- تلفات کمتر

۵- زمان نصب سریعتر

#### **ب - معایب:**

۱- عدم امکان بهره برداری از توربین گاز در صورت وجود عیب بر روی تجهیزات بخار ( عدم قابلیت انعطاف)

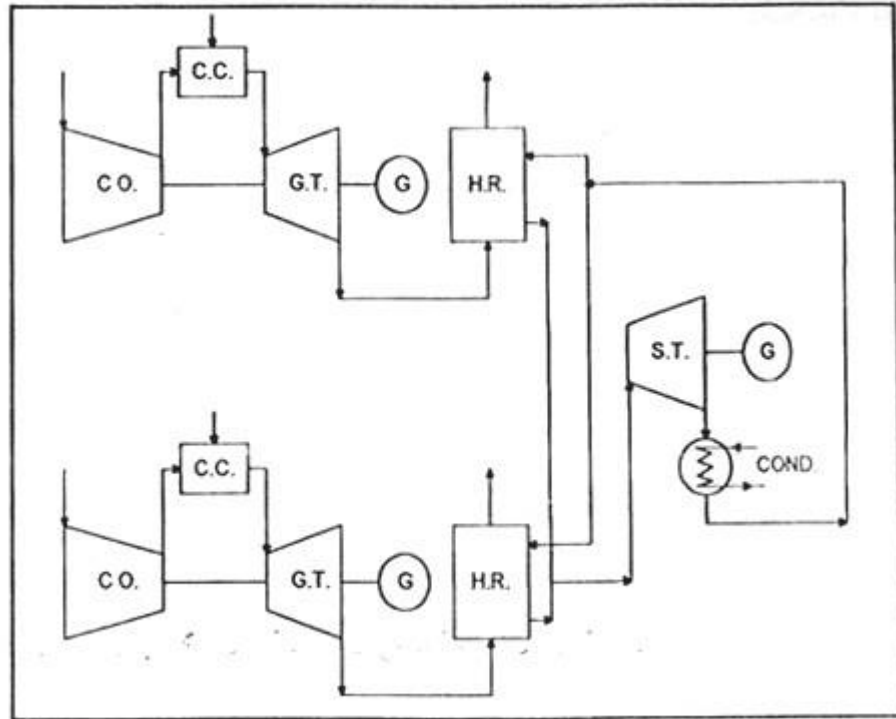
۲- وجود تلفات زیاد انرژی در نیم بار

بدین ترتیب معمولاً این گونه آرایش در سیکل ترکیبی به کار می رود که هدف از احداث آن تولید و تامین بار پایه باشد.

**۳- دو یا چند توربین گاز ، دو یا چند بویلر و یک توربین بخار**

بجز حالات استثنا ، متداول ترین گونه در این نحوه آرایش ، دو توربین گاز با بویلر های مربوطه و یک توربین بخار می باشند.

نحوه آرایش این نوع واحدها به شکل زیر است:



در این روش معمولاً  $1/3$  از انرژی الکتریکی را به توربین بخار و  $2/3$  آن را توربین گاز تولید می نماید. گاز داغ خروجی از هر توربین گاز وارد مستقیماً وارد بویلر مخصوص به خود می گردد. بخار خروجی از بویلر نیز وارد هدر (Header) مشترک شده و توربین بخار را تغذیه می نماید.

از آنجایی که قابلیت بهره برداری بویلر و توربین بخار بیش از توربین گاز می باشد در این آرایش این امکان وجود دارد که در صورت توقف یک واحد گازی ، واحدهای گازی دیگر بتوانند به همراه توربین بخار کار کنند.

قدرت ژنراتور واحدهای گازی و واحد بخار دو توربین گاز مشابه می باشد . متناسب با سلیقه بهره برداری می توان با تعبیه آگروز کمکی در حد فاصل توربین گاز و بویلر ، کارکرد مستقل توربین گاز را ( در صورت توقف توربین بخار یا بویلر ) فراهم نمود.

در این روش ایجاد امکان تعمیرات بر روی بویلر ضروری می باشد که مستلزم تعبیه دمپرهای مناسب است . ( دمپر وسیله ای است که در محل خروج گاز داغ از توربین گاز قرار می گیرد و با ایستادن در وضعیت های مختلف ، امکان انتقال گاز داغ را به آگروز و یا بویلر فراهم می آورد .) البته وجود دمپر مستلزم انجام تعمیرات خاص و بازدیدهای ویژه می باشد که این امر به نوبه خود باعث کاهش قابلیت بهره برداری می گردد. همچنین وجود دمپر پس از مدتی بهره برداری باعث تلفات گاز داغ می گردد که نهایتاً کاهش راندمان را در پی خواهد داشت.

برخی سازندگان و تولید کنندگان انرژی الکتریکی جهت ایجاد امکان بهره برداری غیر هم زمان توربین گاز و بخار ، به جای آگزوز کمکی کندانسور کمکی را توصیه می نماید . حسن این روش در این است که ضمن ایجاد امکان بهره گیری از توربین گاز در مواقع توقف توربین بخار و جلوگیری از تلفات گاز داغ از طریق آگزوز کمکی ، راه اندازی سریع بویلر و توربین بخار را باعث می گردد . این روش بیشتر در مواردی که فروش بخار و یا آب گرم مصرف شهری و صنعتی نیز مد نظر باشد مورد استفاده قرار می گیرد.

**محاسن و معایب سیستم دو یا چند توربین گاز ، دو یا چند بویلر و یک توربین بخار در قیاس با واحد بخاری ساده به صورت زیر است:**  
**الف - محاسن:**

- ۱- هزینه سرمایه گذاری کمتر
- ۲- امکان اجرای مرحله ای طرح
- ۳- زمان نصب کوتاه تر
- ۴- قابلیت انعطاف بیشتر و امکان بهره برداری جزء به جزء
- ۵- راندمان بیشتر در حالت نیم بار

**ب - معایب:**

- ۱- نیاز به سوخت مرغوب تر
  - ۲- عوامل کنترل بیشتر
- این گونه آرایش در مواردی که هدف تامین بار پایه و میانی است به کار می رود.

**- ۴ چند توربین گاز ، یک بویلر و یک توربین بخار**

علت اصلی مطالعه بر روی این چنین آرایشی تحلیل هزینه سرمایه گذاری به حداقل ممکن می باشد در ابتدای امر به سبب عدم تقارن نوع سه توربین گاز و یک بویلر و عدم امکان توزیع یکنواخت گاز داغ به داخل بویلر ، خوردگی و فرسودگی های ایجاد شده ناشی از آن باعث شد مطالعه بر روی این نوع آرایش ها مردود شناخته شود. در صورت موفقیت در بهره گیری از این نوع آرایش ، در واقع ضریب آمادگی سیستم وابستگی کامل به بویلر پیدا می کرد.

در عمل به علت اینکه امکان کارکرد همزمان توربین های گازی ، بویلر و توربین بخار کم است و نیز گاز داغ را نمی توان در حالات مختلف به طور یکنواخت در بویلر توزیع نمود ، این روش تولیدی با اقبال مواجه نگردد.

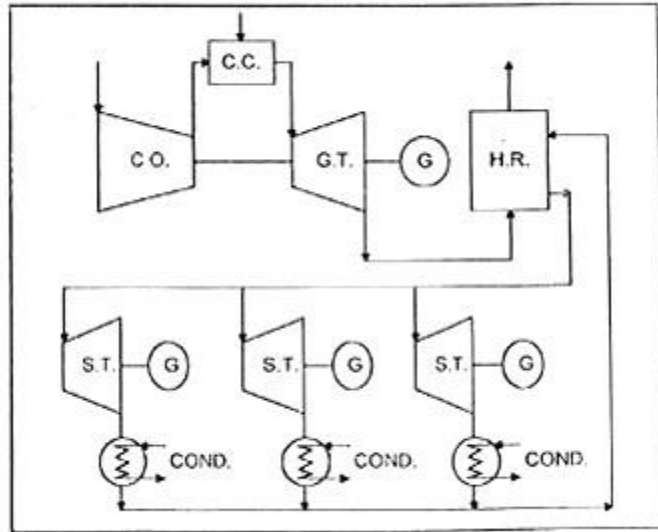
### - یک توربین گاز ، یک بویلر و چند توربین بخار

قدمت زیاد واحدهای بخاری و امکان باز سازی مجدد آنها و شرایط کار این گونه واحدها باعث شد که غالب تولیدکنندگان انرژی الکتریسیته به فکر بازسازی این گونه واحدها با استفاده از واحدهای گازی بیفتند. در این روش ضمن ایجاد امکان به کار گیری مجدد از سرمایه گذاری انجام شده ، می توان نسبت به افزایش راندمان واحدهای قدیمی تر نیز اقدام کرد.

این روش بازسازی و نوسازی تنها برای واحدهای گازسوز و یا با سوخت مایع امکان پذیر است . این روش بدان جهت قوت گرفت که غالباً قسمت حساس واحدهای بخاری یعنی بویلر آنها ، معمولاً پس از مدتی کارکرد نیاز به بازسازی کامل دارد در صورتی که توربین و سایر متعلقات آن با انجام تعمیرات جزئی قابل استفاده مجدد می باشند. بدین ترتیب با تلفیق تکنولوژی قدیمی ( توربین بخار ) که دارای شرایط کار قابل انطباق با شرایط تکنولوژی جدید توربین گاز می باشد ، شرایط بهره برداری مناسبی از توربین گاز جدید و توربین بخار قدیمی فراهم می آید. به عنوان مثال در صورتی که هدف بازسازی سه واحد بخار ۲۰ مگاواتی باشد ، می توان به جای نوسازی سه بویلر ، با نصب یک واحد توربین گاز ۱۲۰ مگاواتی و یک بویلر بدون مشعل ، ضمن افزایش قدرت مجموعه به ۱۸۰ مگاوات ، با جزئی سرمایه گذاری بیشتر راندمان مجموعه را از ۳۰ درصد ، که در صورت کارکرد مستقل هر کدام حاصل می شود ، به بیش از ۴۰ درصد افزایش داد که البته این افزایش ۱۰ درصدی در راندمان هزینه های سوخت را به میزان ۱/۳ کاهش خواهد داد.

مدل مربوط به این طرح در شکل زیر آورده شده است:





مصرف گاز با ارزش گرمایی پایین به عنوان سوخت در نیروگاهی که برای تولید برق از چرخه ترکیبی استفاده می‌کند، یکی از موارد کاربرد جالب این نوع سوخت به شمار می‌رود. چرخه ترکیبی به چرخه‌ای گفته می‌شود که در دمایی منبع گرم از توربین گازی و در دمایی منبع سرد از توربین بخار استفاده می‌کند.

دستگاه تهیه گاز با ارزش گرمایی پایین، بسته به نوع فرایند مورد استفاده، در فشارها و دماهای متعددی عمل می‌کند. کارکرد بعضی از این دستگاهها در فشار حداکثر تا  $5/3 \text{ Mpa}$  و دماهای خروجی  $540$  تا  $1100$  صورت می‌گیرد. به طوری که قبلاً اشاره شد، گاز خروجی باید جهت تصفیه و پاکسازی خنک شود. در حالت عادی این خنک شدن، با مقدار زیادی اتلاف انرژی و دفع آن به محیط همراه است. مزیت چرخه ترکیبی در این است که از فشار زیادی واحد تهیه گاز بهره‌گیری می‌کند و به کمک یک مبادله‌کن گرمایی گاز به گاز تا حد زیادی مانع اتلاف انرژی و دفع آن به محیط می‌شود.

در یک طرح پیشنهادی (۳۳) گازی که واحد تهیه گاز را در نقطه ۱ و در دمایی حدود  $540$  و فشار ۲ می‌کند، مقداری از گرمایی خود را در یک مبادله‌کن گرمایی بازیابی از دست می‌دهد و در نقطه ۲ آن را ترک می‌کند و سپس در یک مبادله‌کن گرمایی خارجی تا دمایی پایین‌تر نقطه ۳ به حدی خنک می‌شود که دمایی آن برای فرایندهای تصفیه و پاکسازی در فاصله مراحل ۳ تا ۴ سازگار باشد. نگاه، گاز گرمایی دفع شده به مبادله‌کن گرمایی بازیابی را بازپس می‌گیرد و آن را در ۵ ترک می‌کند. سپس این گاز وارد اتاق احتراق توربین گازی می‌شود و در آنجا با هوای ممتراکمی که از کمپرسور می‌آید مخلوط می‌شود و آن را در نقطه ۶ و با دمایی حدود  $980$  ترک می‌کند. بعداً در توربین گاز انبساط می‌یابد و در نقطه ۷ و با دمایی حدود  $520$  از آن خارج

می‌شود. آنگاه گاز وارد يك مولد بخار بازیابی می‌شود و پس از تولید بخار، مولد را در نقطه ۸ و با دمای در حدود ۱۲۵ ترك می‌کند و وارد دودکش می‌شود.

توربین گاز، یکی از دو مولد برق و کمپرسور را تغذیه می‌کند. کمپرسور هوای جو را در نقطه ۹ و با دمای حدود ۱۵ دریافت و آن را تا دمای ۳۱۵ مترکم می‌کند. کمپرسور دو وظیفه بر عهده دارد: اول تأمین هوای احتراق مورد نیاز اتاق احتراق در ۱۰، و دوم تأمین هوای مورد نیاز واحد تهیه گاز در ۱۱ هوای واحد تهیه گاز، قبلاً در گرمکن آب تغذیه چرخه بخار تا دمای ۱۲ خنک می‌شود، سپس فشار آن در يك کمپرسور تقویتی که با موتور الکتریکی کار می‌کند تا فشار واحد تهیه گاز در ۱۳ افزایش یابد. واحد تهیه گاز طوری طرح می‌شود که بخار مورد نیاز خود را از آب تغذیه در ۱۴ تأمین می‌کند. زغال در نقطه ۱۵ با مخلوط هوا و بخار وارد واکنش می‌شود و گاز با ارزش گرمایی پایین را در ۱ تولید می‌کند.

چرخه بخار نسبتاً استاندارد است. بخار فوق گرم در مولد بخار بازیابی در فشار 2 Mpa و دمای ۴۸۰ در نقطه ۱۶ تولید می‌شود، سپس در توربین بخار انبساط می‌یابد و توربین بخار مولد دوم را راه‌اندازی می‌کند، و سرانجام در ۱۷ به چگالنده وارد می‌شود. مایع در ۱۸ وارد پمپ می‌شود و پس از خروج از آن در ۱۹ وارد گرمکن آب تغذیه می‌شود و در آنجا از هوای مترکم واحد تهیه گاز گرما می‌کند. در این طرح از بخار زیرکش شده توربین بخار استفاده‌ای به عمل نمی‌آید، هر چند که چنین گرمایش آب تغذیه‌ای را می‌توان به کار برد. آب تغذیه در ۲۰ وارد مولد بخار بازیابی می‌شود و به این ترتیب چرخه کامل می‌شود.