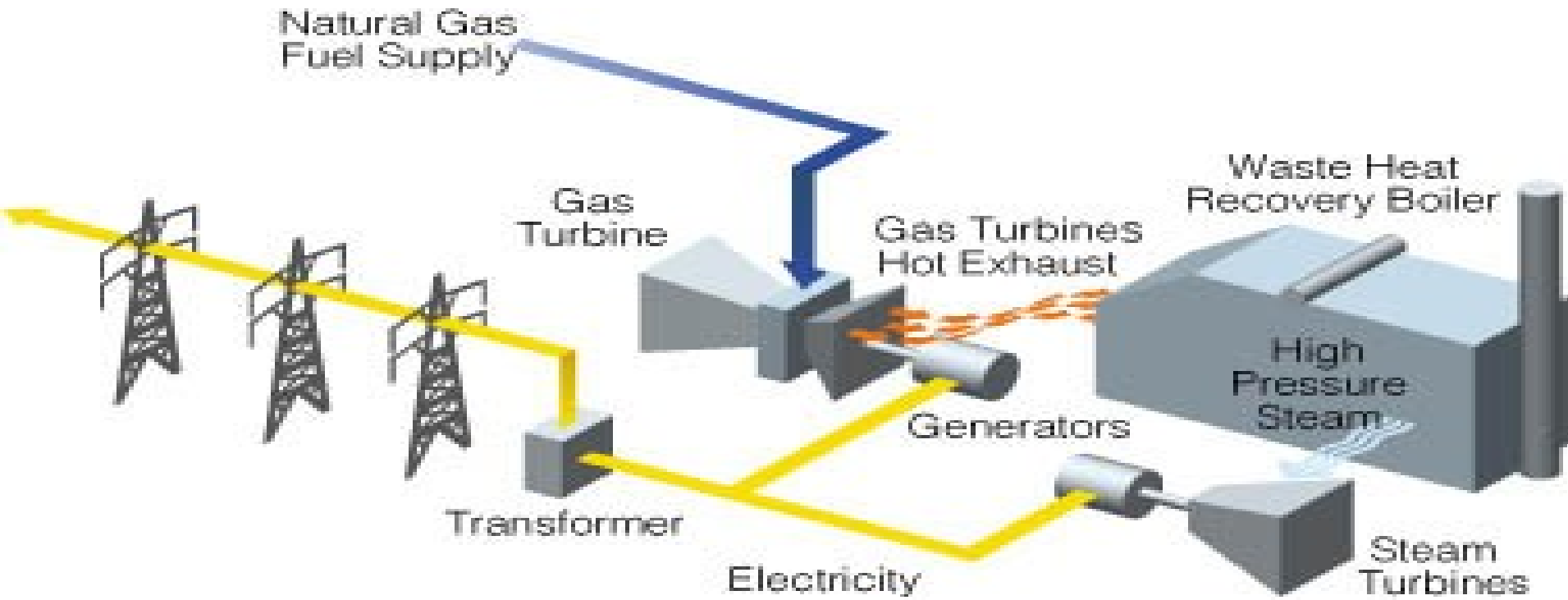


نام درس: تولید انرژی الکتریکی

بخش چهارم

نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی

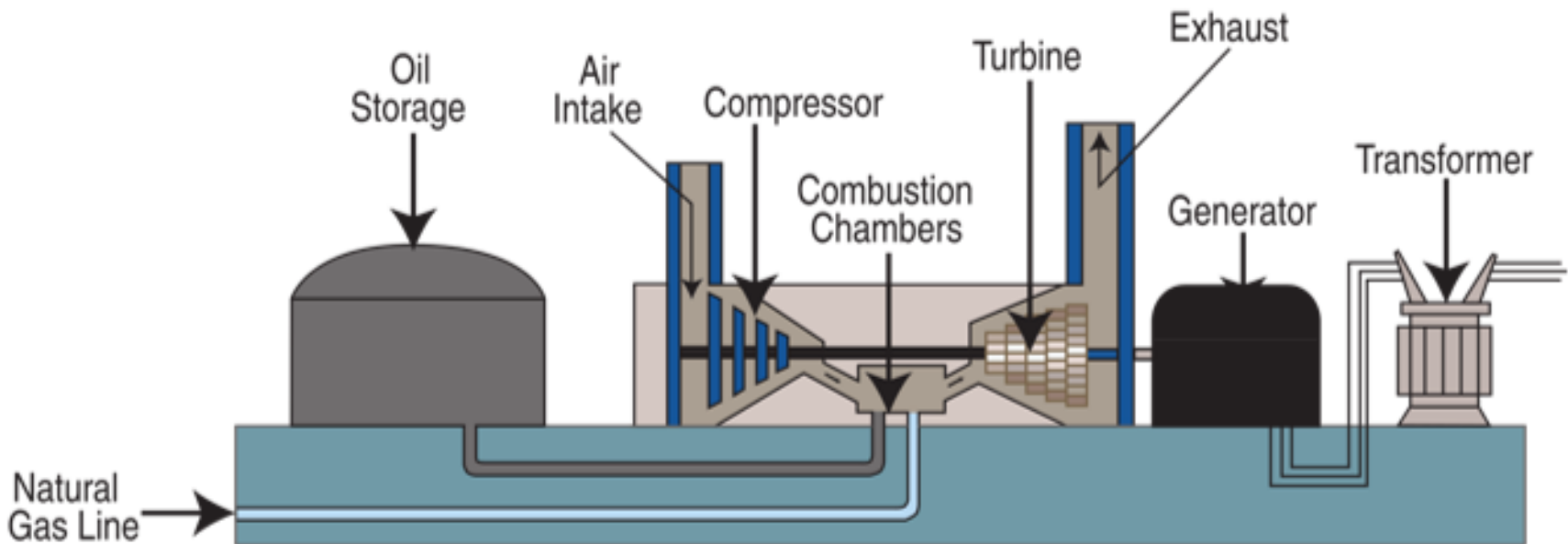
مدرس: دکتر علی کریمی



- ❖ نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی جز نیروگاه های پرکاربرد حرارتی در کشور هستند:
- ✓ نیروگاه های گازی ایران در سال ۹۷: سهم نصب (ظرفیت نامی) حدود ۳۰ درصد (کل ظرفیت نامی در کشور ۸۰۲۲۵MW) و سهم تولید انرژی حدود ۲۲/۵ درصد بوده است؛
- ✓ نیروگاه های سیکل ترکیبی ایران در سال ۹۷: سهم نصب (ظرفیت نامی) حدود ۲۹ درصد و سهم تولید انرژی حدود ۴۲ درصد بوده است؛
- ❖ برخی از نیروگاه های گازی مهم ایران: رودشور، ری، جنوب اصفهان، سنندج، و ...
- ❖ برخی از نیروگاه های سیکل ترکیبی مهم ایران: دماوند، منتظر قائم، کازرون، قم، رجائی قزوین و ...
- ❖ نیروگاه های گازی:
- ✓ در این نوع نیروگاه ها سیال عامل، گاز حاصل از احتراق است (که از ترکیب هوای محیط و سوخت حاصل می شود)؛
- ✓ بازده این نوع نیروگاه ها پایین است (بین ۲۰ تا ۳۰ درصد)؛
- ✓ سرمایه گذاری اولیه پائینی نسبت به دیگر نیروگاه ها دارند؛
- ✓ از لحاظ بهره برداری اقتصادی بهتر است در ساعات پیک بار استفاده شوند.
- ✓ دارای زمان راه اندازی کوتاه بوده و سریع وارد مدار می شوند؛
- ✓ آلودگی محیط کمتری دارند؛
- ❖ بهتر است به صورت سیکل ترکیبی استفاده شوند تا بازده آنها افزایش یابد. در نیروگاه های سیکل ترکیبی، از گاز خروجی داغ واحدهای گازی به عنوان انرژی حرارتی ورودی واحدهای بخار استفاده می شود (معمولاً، هر دو واحد گازی می توانند یک واحد بخار با همان اندازه را بدون نیاز به سوخت اضافه تغذیه کنند).

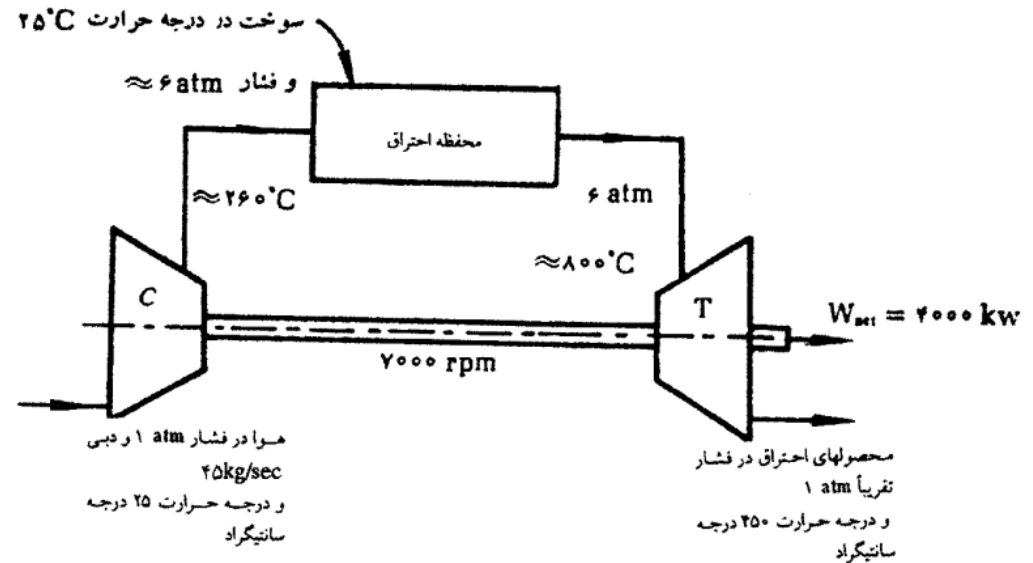
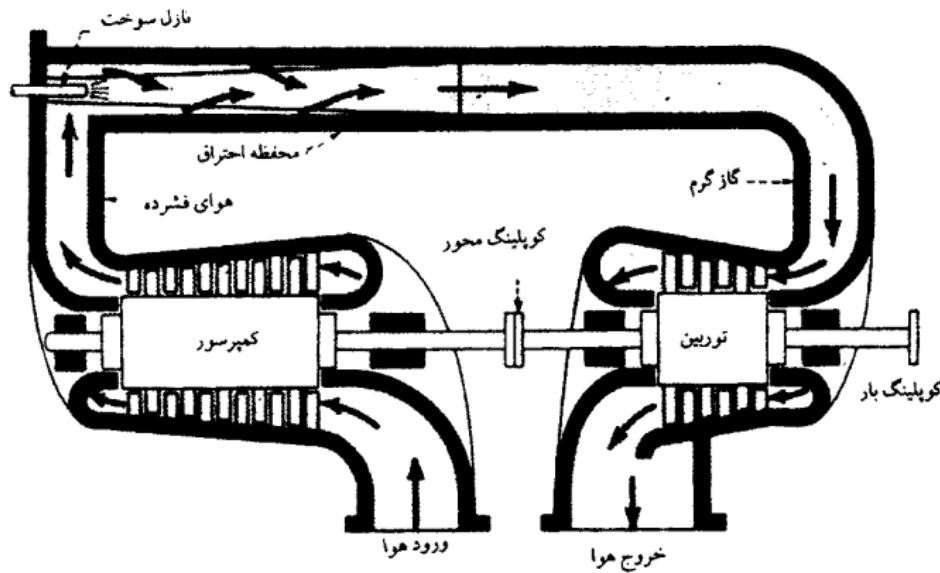
❖ اصول کار توربین گازی:

- ✓ ابتدا هوا با دما و فشار محیط، به صورت پیوسته، وارد کمپرسور می شود و تحت تحول آدیاباتیک، متراکم می شود. سپس، این هوای فشرده وارد محفظه احتراق می گردد.
- ✓ در محفظه احتراق، سوخت نیز اضافه می شود و هوای فشرده عبوری از محفظه احتراق، در یک تحول فشار ثابت، گرم می گردد.
- ✓ در ادامه، هوای فشرده و گرم از توربین عبور می کند و محور آن را می چرخاند. البته توربین، هم محور کمپرسور را می چرخاند و هم کار مفید روی محور روتور ژنراتور انجام می دهد.



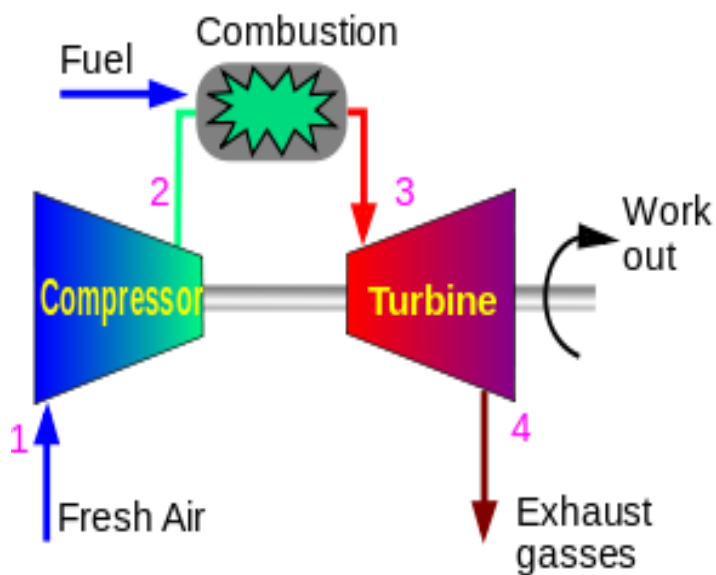
❖ اصول کار توربین گازی:

اعداد نشان داده در شکل برای یک توربین نوعی است:

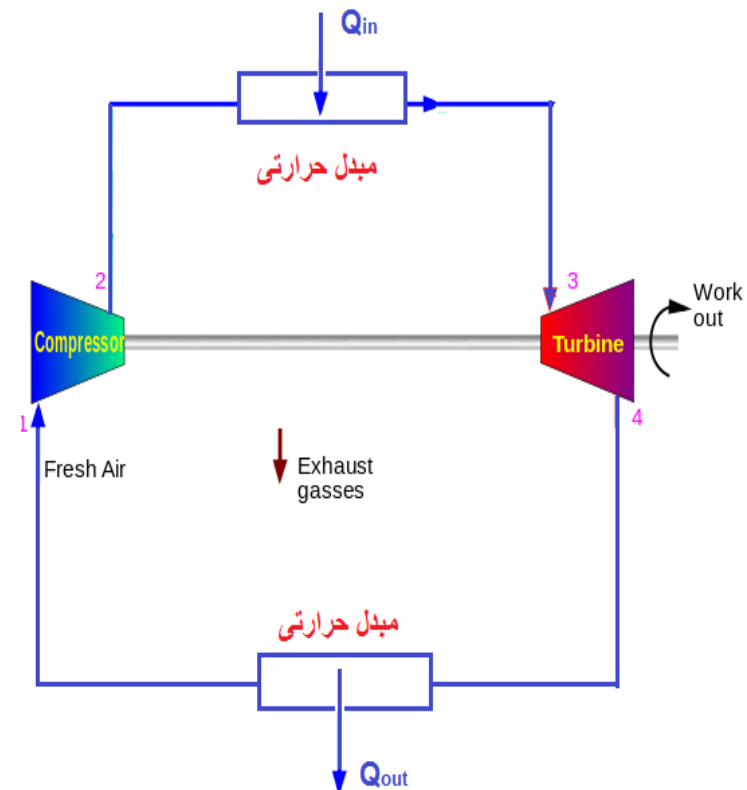


❖ سیکل استاندارد برایتون:

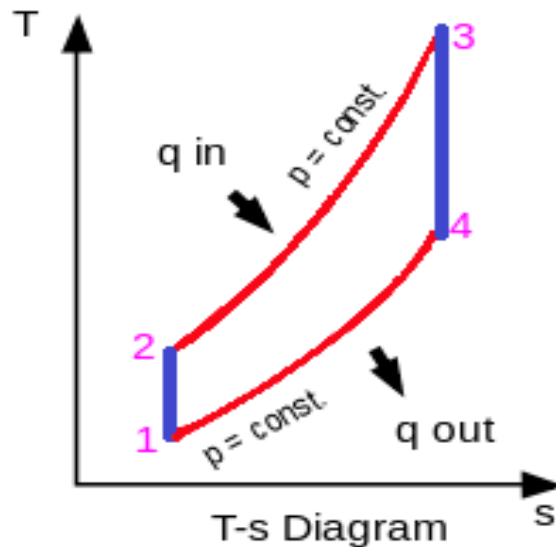
- ✓ به جای تحول احتراق، یک تحول انتقال حرارت در نظر گرفته می شود؛
- ✓ هوای این سیکل را گاز کامل (با گرمای ویژه ثابت و دبی جرمی ثابت) در نظر می گیریم.
- ✓ محیط را یک مبدل فرضی در نظر می گیریم.
- ✓ تحول های کمپرسور و توربین را آدیاباتیک و برگشت پذیر در نظر می گیریم.



سیکل واقعی (سیکل باز)



سیکل استاندارد برایتون (سیکل بسته)



❖ سیکل استاندارد برای تون (منحنی T-S):

✓ منحنی T-S شامل دو تحول آنتروپی ثابت (در کمپرسور و توربین) و دو تحول فشار ثابت است:

❖ بازده سیکل برای تون:

✓ با فرض کامل بودن گاز و C_p گرمای ویژه در فشار ثابت (h آنتالپی گاز (Enthalpy) و یا گرمای سیستم در فشار ثابت بر حسب ژول و T دمای گاز):

$$C_p = \frac{\partial h}{\partial T}$$

$$Q_A = h_3 - h_2 = C_p \cdot (T_3 - T_2)$$

✓ میزان حرارت داده شده به سیال هوا در محفظه احتراق (تحول ۲-۳):

$$Q_R = h_1 - h_4 = C_p \cdot (T_1 - T_4)$$

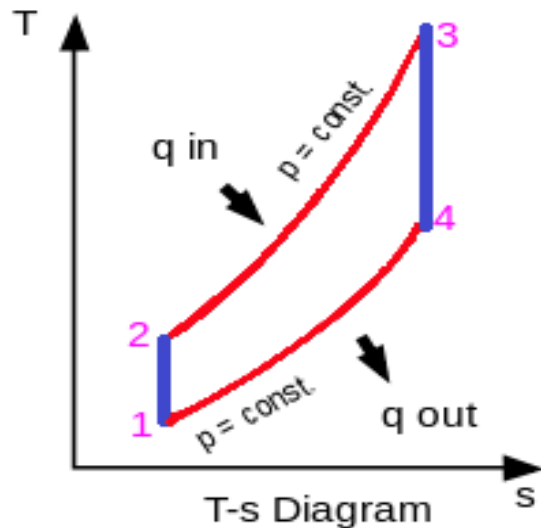
✓ میزان حرارت گرفته شده از سیال هوا در مبدل فرضی (تحول ۱-۴):

$$W_{net} = \sum Q = C_p \cdot (T_1 - T_2 + T_3 - T_4)$$

✓ براساس قانون اول ترمودینامیک، کار خالص انجام شده برابر است با:

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_A} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

✓ بازده:



❖ همچنین با توجه به کامل بودن گاز و روابط فشار و دما در تحول ایزنتروپیک:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

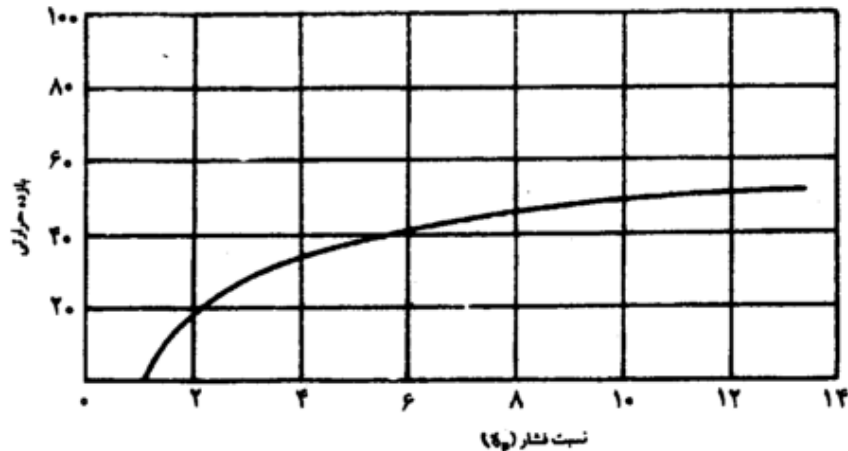
❖ در نتیجه بازده سیکل ایده آل برای تون برابر است با:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

❖ در مقایسه با سیکل ایده آل کارنو:

❖ با توجه به اینکه، همواره T_1/T_3 کوچکتر از T_1/T_2 است، در نتیجه: $\eta_c > \eta_t$



❖ تغییرات بازده بر حسب نسبت فشارها:

افزایش بیش از اندازه فشار باعث افزایش درجه حرارت سیال ورودی به توربین (T_3) می شود. در عمل، نمی توان این دمار را با توجه به محدودیت های پره های توربین افزایش داد.

$$\gamma_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

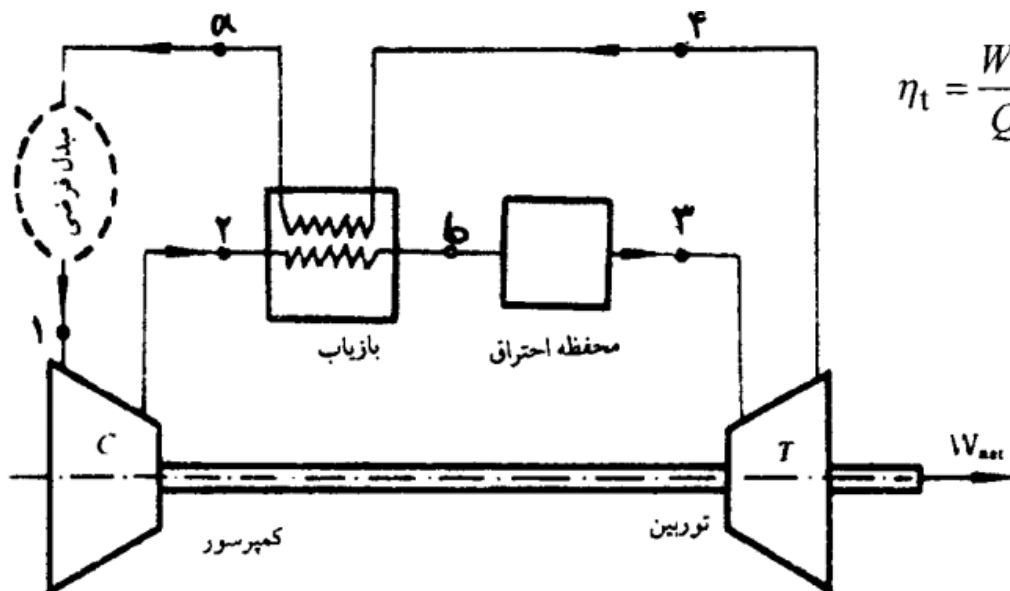
❖ راه های افزایش راندمان نیروگاه گازی:

1. سیکل توربین گازی با عمل بازیاب
2. سیکل توربین گازی با تراکم چند مرحله ای
3. سیکل توربین گازی با انبساط چند مرحله ای

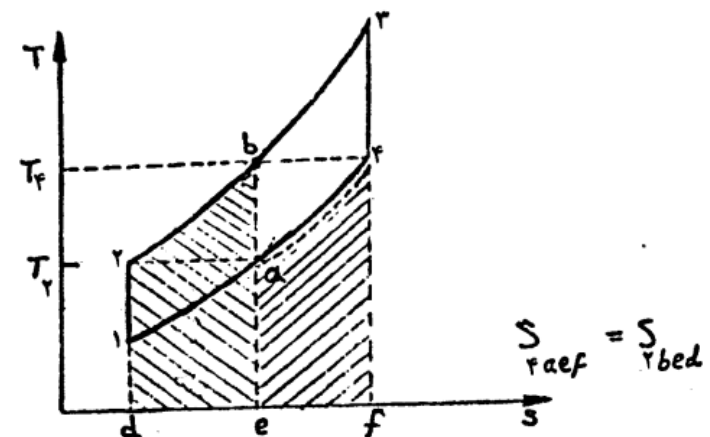
1. سیکل توربین گازی با عمل بازیاب:

✓ به منظور افزایش راندمان حرارتی توربین گازی باید از هوای گرم خارج شده از توربین استفاده مطلوب کرد.

✓ با امکان تبادل حرارت بین گازهای خروجی از توربین و هوای تخلیه شده از کمپرسور دمای هوای ورودی به توربین افزایش و دمای خروجی از توربین کاهش می یابد.

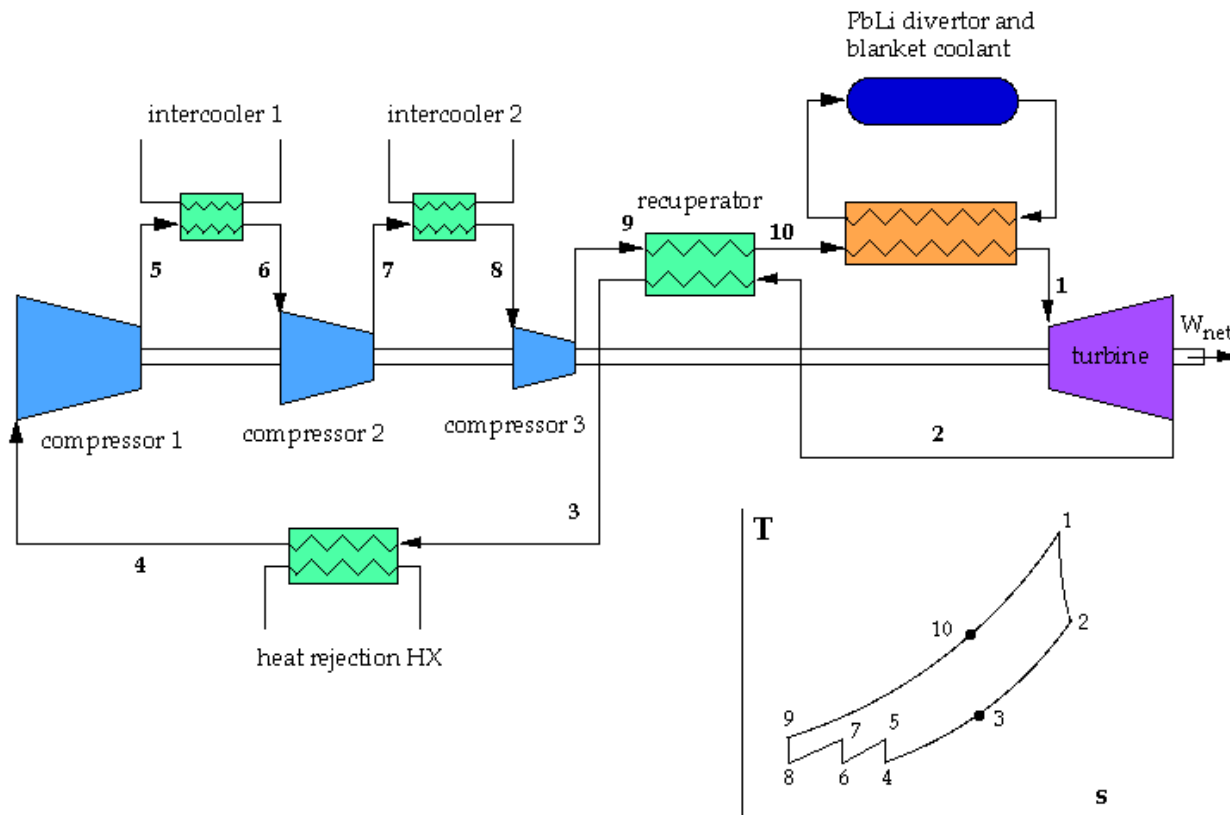


$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_A} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)}{h_4 - h_5} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_5}$$



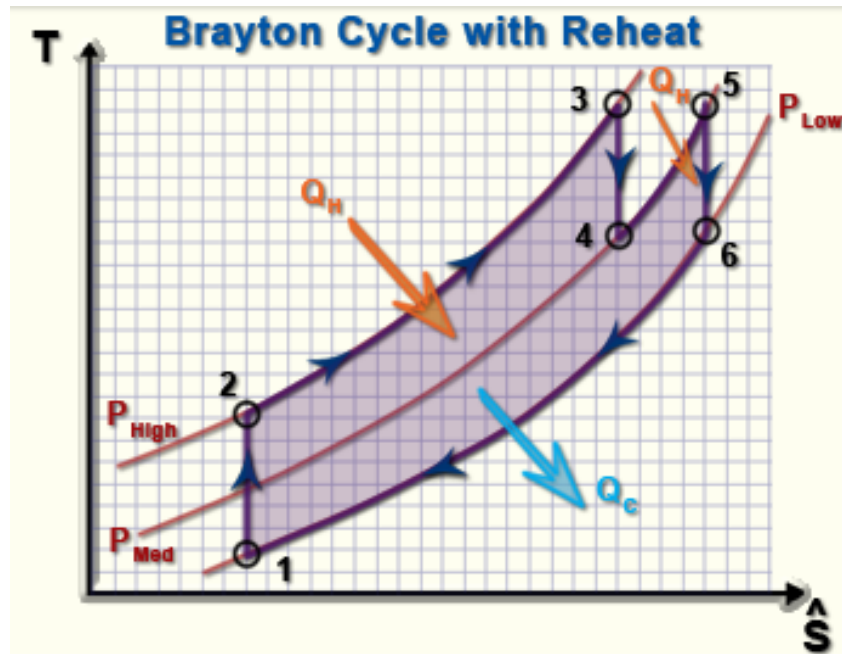
2. سیکل توربین گازی با تراکم چند مرحله ای:

- ✓ به منظور صرفه جویی در کار کمپرسور مناسب است تا عمل تراکم در آن بصورت چند مرحله ای انجام شود.
- ✓ با افزایش فشار دمای سیال نیز افزایش می یابد و این افزایش دما باعث مشکل شدن عمل فشرده سازی بیشتر می گردد.
- ✓ به همین دلیل بین مراحل فشرده سازی عمل خنک سازی نیز انجام می گیرد.
- ✓ این عمل همراه با عمل بازیاب باعث افزایش راندمان سیکل می گردد.

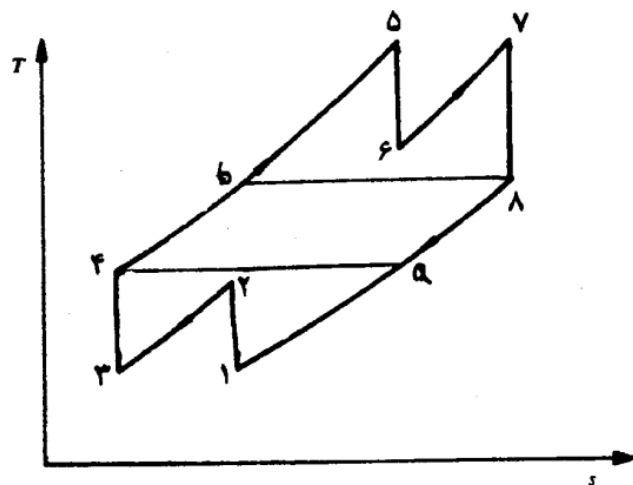
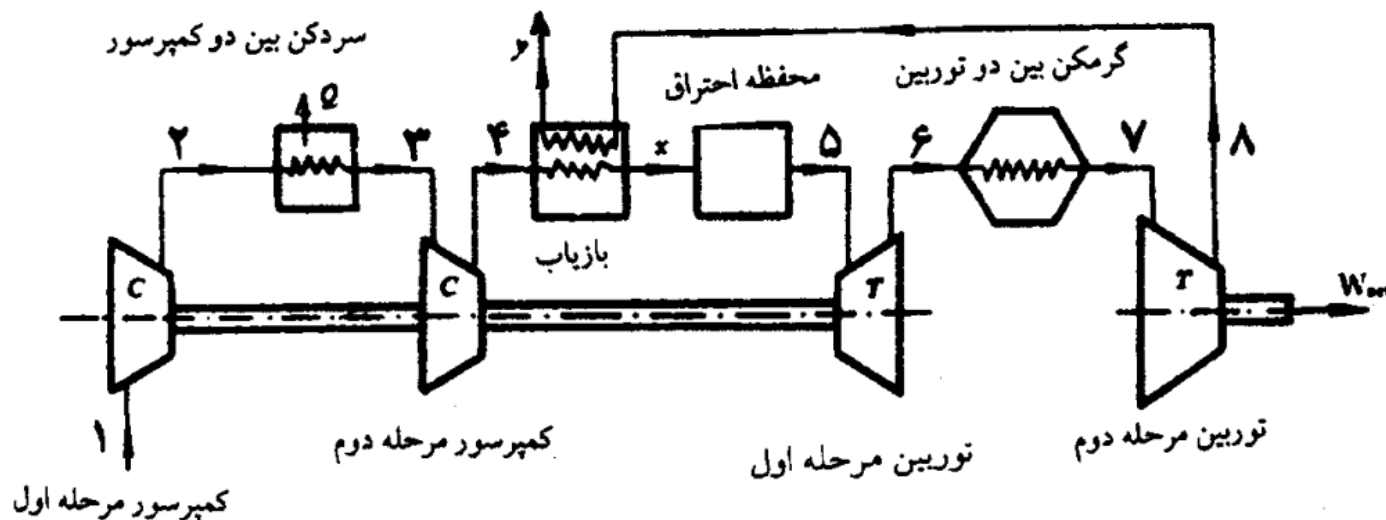


3. سیکل توربین گازی با انبساط چند مرحله ای:

- ✓ با استفاده از دو توربین به جای یک توربین
- ✓ یکی از آنها جهت گرداندن کمپرسور و دیگری جهت اتصال به ژنراتور
- ✓ این کار با گرم کردن گاز خروجی از توربین اول انجام می گردد (Reheat در یک محفظه احتراق دیگر).
- ✓ این عمل همراه با عمل بازیاب باعث افزایش راندمان نیروگاه می گردد.



- ❖ می توان از تمام روش های ذکر شده بالا بردن راندمان استفاده نمود (خصوصا اگر تبدیل به سیکل ترکیبی نشود).
- ❖ سیکل برایتون با تراکم و انبساط چند مرحله ای و عمل بازیاب:

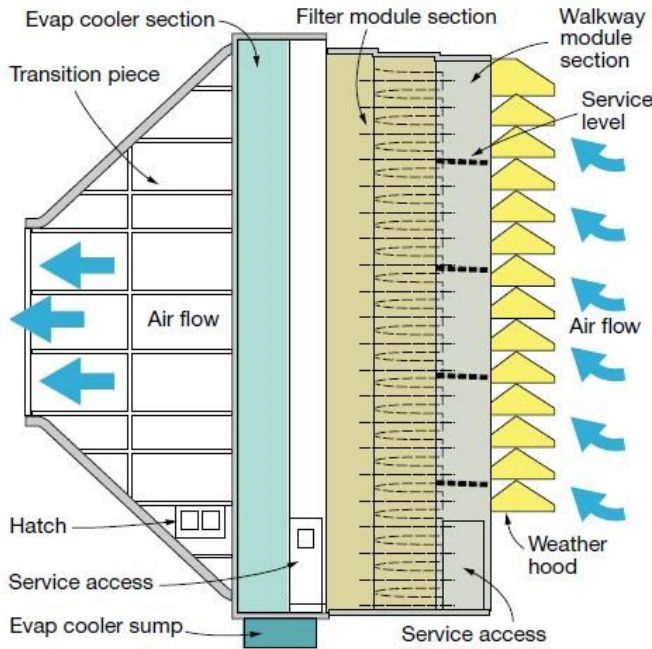


نکته: حداکثر بازده زمانی است که نسبت فشارها در دو کمپرسور و در دو توربین یکی باشد.

همچنین در حالت ایده آل فرض می شود که $T_7=T_5$, $T_1=T_3$

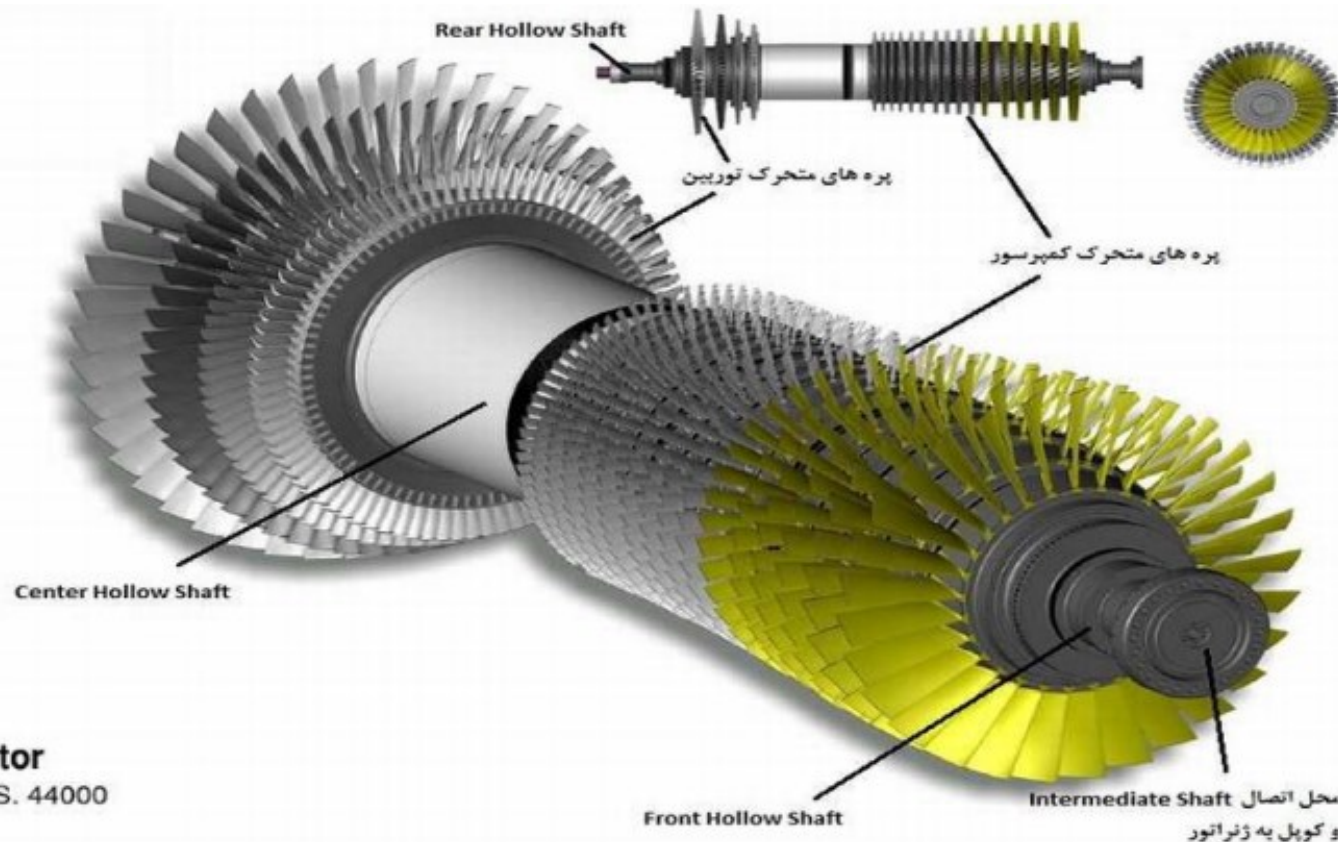
تجهیزات نیروگاه گازی (Air Intake)

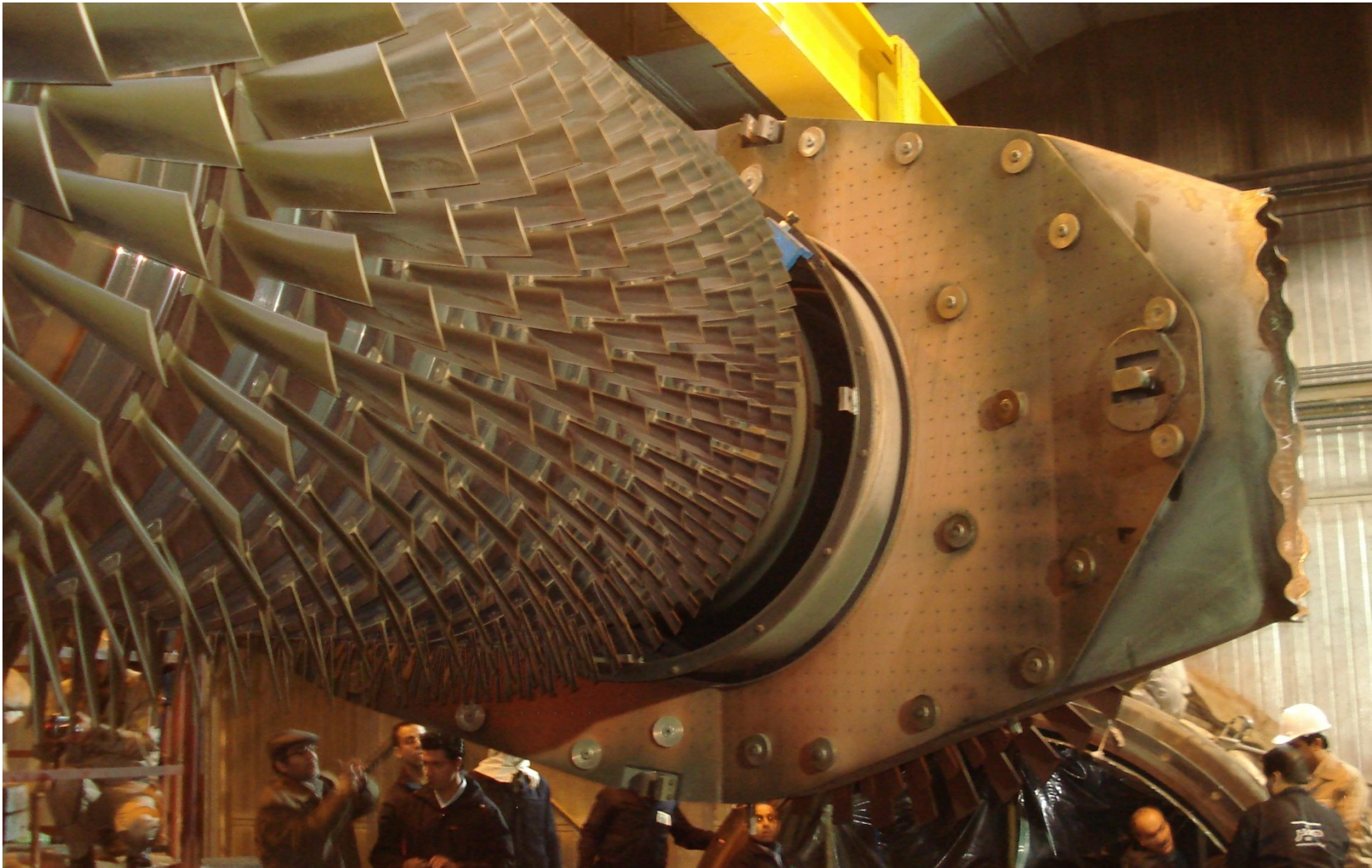
❖ تامین هوای مورد نیاز کمپرسور (دارای فیلترهای متعدد)



کمپرسورهای محوری (Axial Compressor)

- ✓ مشابه توربین های نیروگاه شامل پره های ثابت (استاتور) و متحرک (روتور) هستند؛
- ✓ شتاب گیری هوا توسط پره های متحرک و سپس افزایش فشار توسط پره های ثابت (وظیفه پره های ثابت در توربین هاست)؛
- ✓ با استفاده از افزایش تعداد پره های ثابت و متحرک (تعداد طبقه های کمپرسور: مثلا در واحدهای گازی ۱۶۰ مگاوات V94.2 ، ۱۶ طبقه وجود دارد) می توان فشار را بیشتر افزایش داد؛

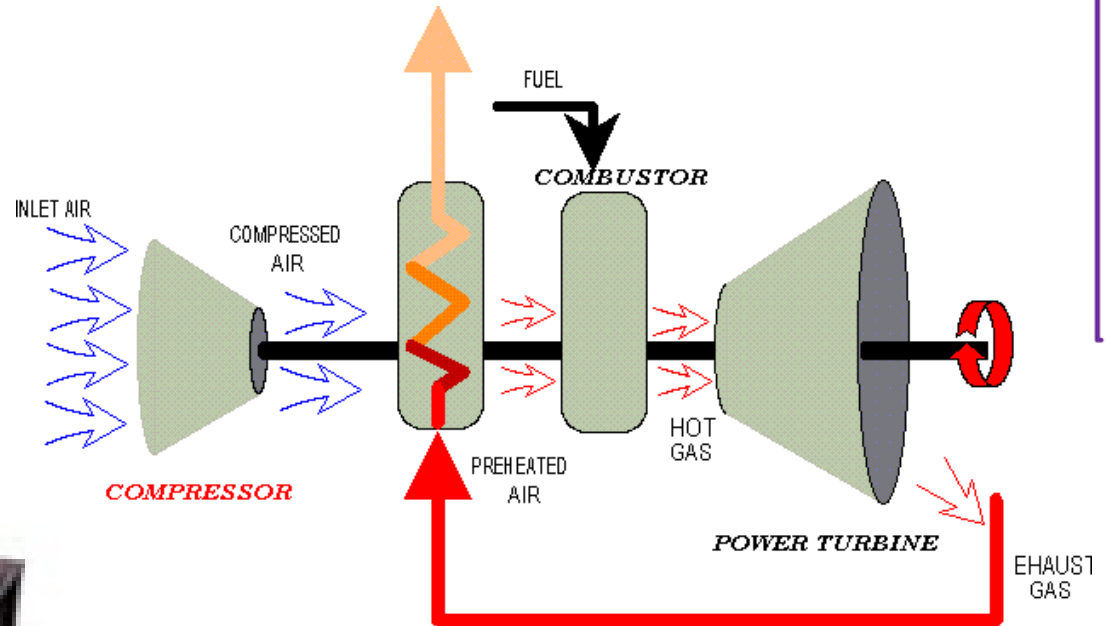




کمپرسور واحدهای گازی ۱۶۰ مگاوات V94.2

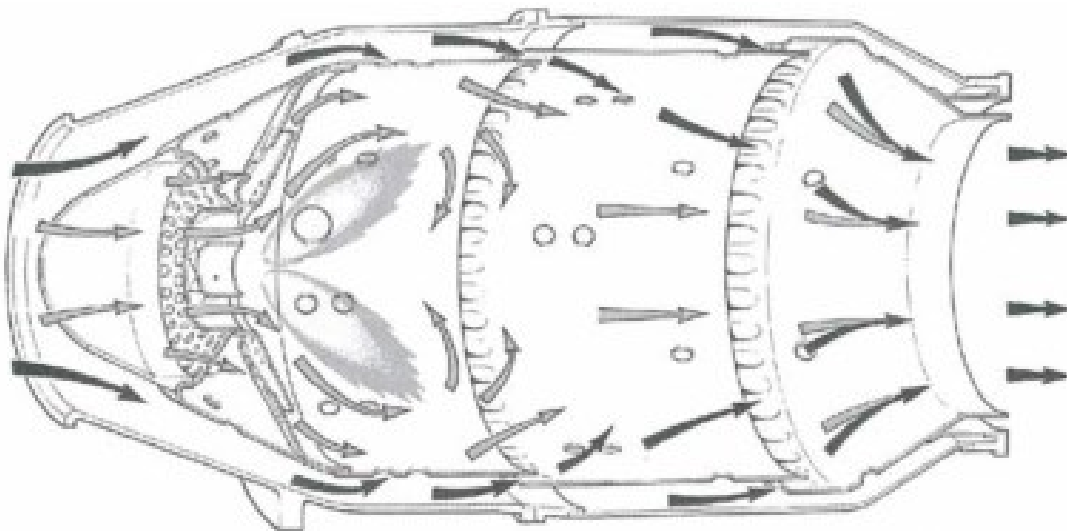
تجهیزات نیروگاه گازی (بازیاب)

- ❖ در نیروگاه های گازی با قدرت زیاد بکارگیری بازیاب (Regenerator) برای افزایش بازده ضروری است.
- ❖ در بازیاب، دمای هوای ورودی به محفظه احتراق با استفاده از گازهای داغ خروجی از آگروز، افزایش می یابد.



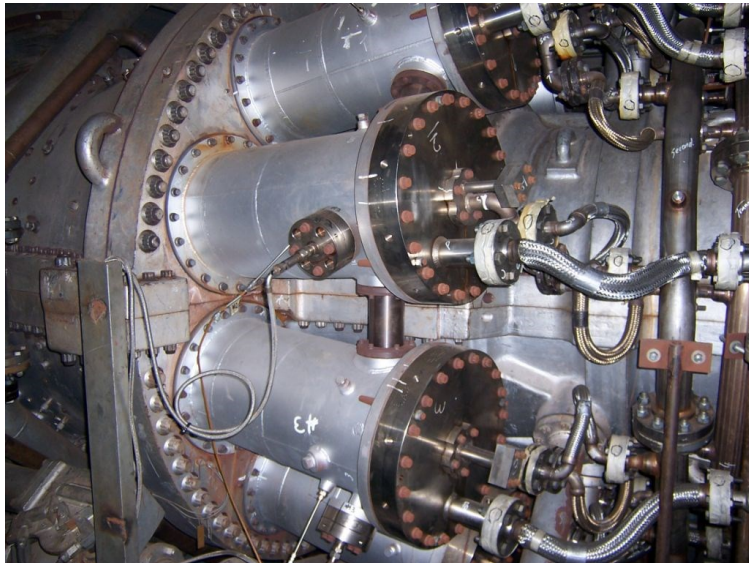
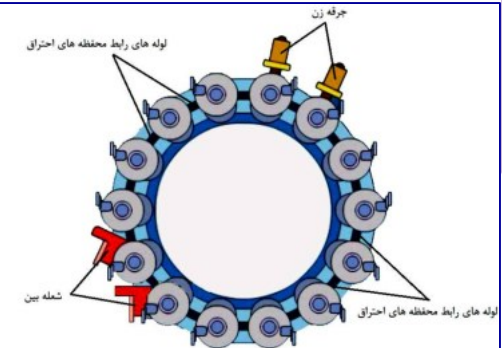
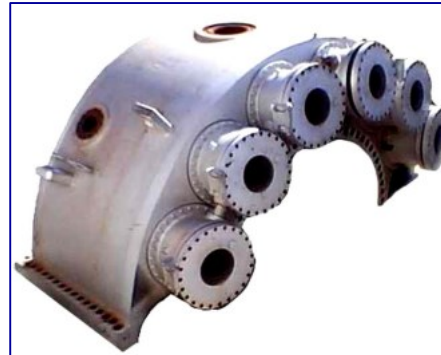
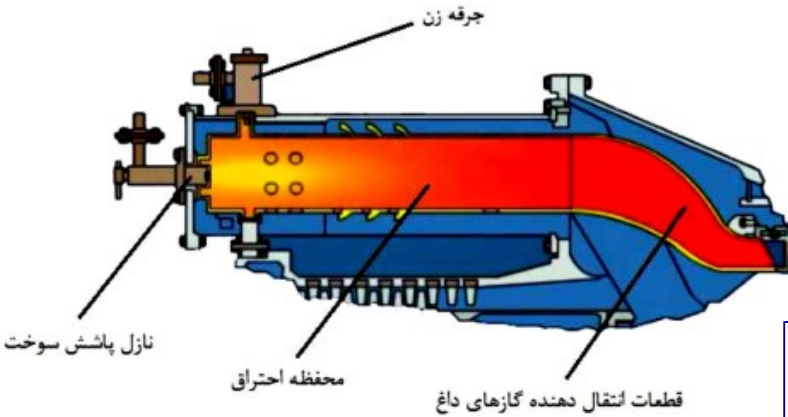
❖ محفظه احتراق (Combustion Chamber)

- ✓ بالا بردن دمای هوای فشرده شده خروجی از بازیاب
- ✓ مخلوط شدن مقدار کمی از سوخت با هوای فشرده و تولید حرارت
- ✓ مقدار هوای زیاد باعث خاموش شدن شعله می گردد. بدین منظور هوای داخل محفظه به دو قسمت تقسیم می شود:
 - هوای اولیه (Primary air) که مستقیماً با سوخت ترکیب شده و دمای آن بسیار بالا می رود.
 - هوای ثانویه (Secondary air) که دمای آن به واسطه هوای اولیه و سوخت بالا می رود.
- ✓ ترکیب شدن مناسب (کامل و همگن) هوای اولیه و ثانویه بسیار مهم است. ترکیب نامناسب سبب آسیب به دیواره محفظه می گردد.
- ✓ جهت ترکیب بهتر هوای اولیه و ثانویه از Whirl Vane (پره چرخان) استفاده می شود.
- ✓ در محفظه احتراق مادامی که سوخت و هوا وجود دارد باید مشعل ها روشن باشند. یکی از حفاظت های توربین گازی قطع سوخت در هنگام عدم مشاهده شعله است.
- ✓ سوخت بکار رفته بیشتر گاز طبیعی و در مواردی سوخت های مایع است.



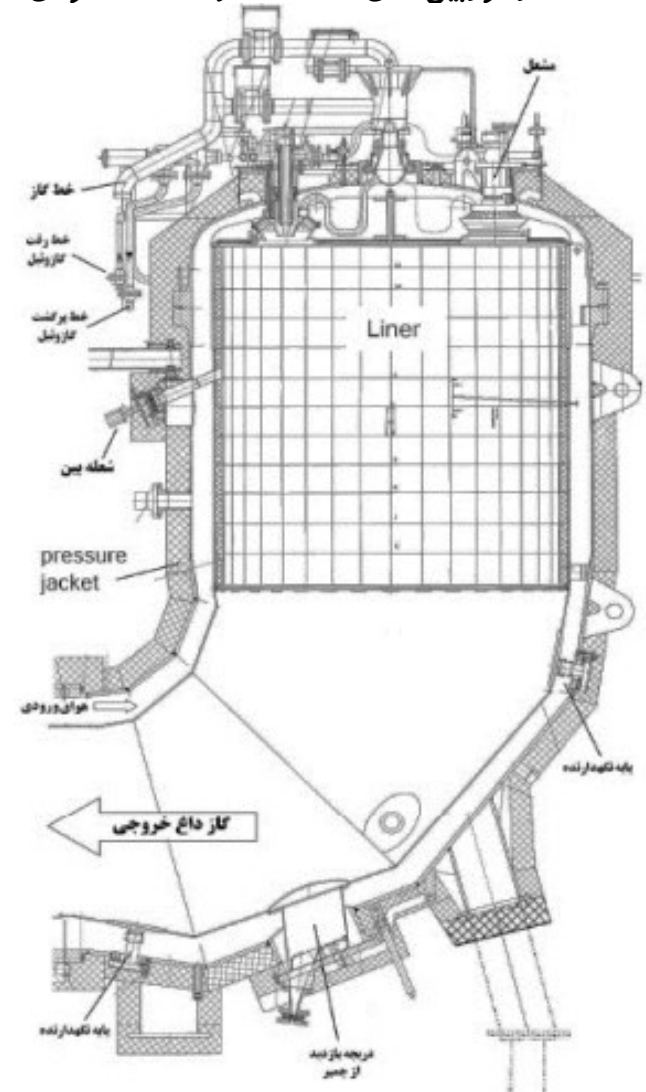
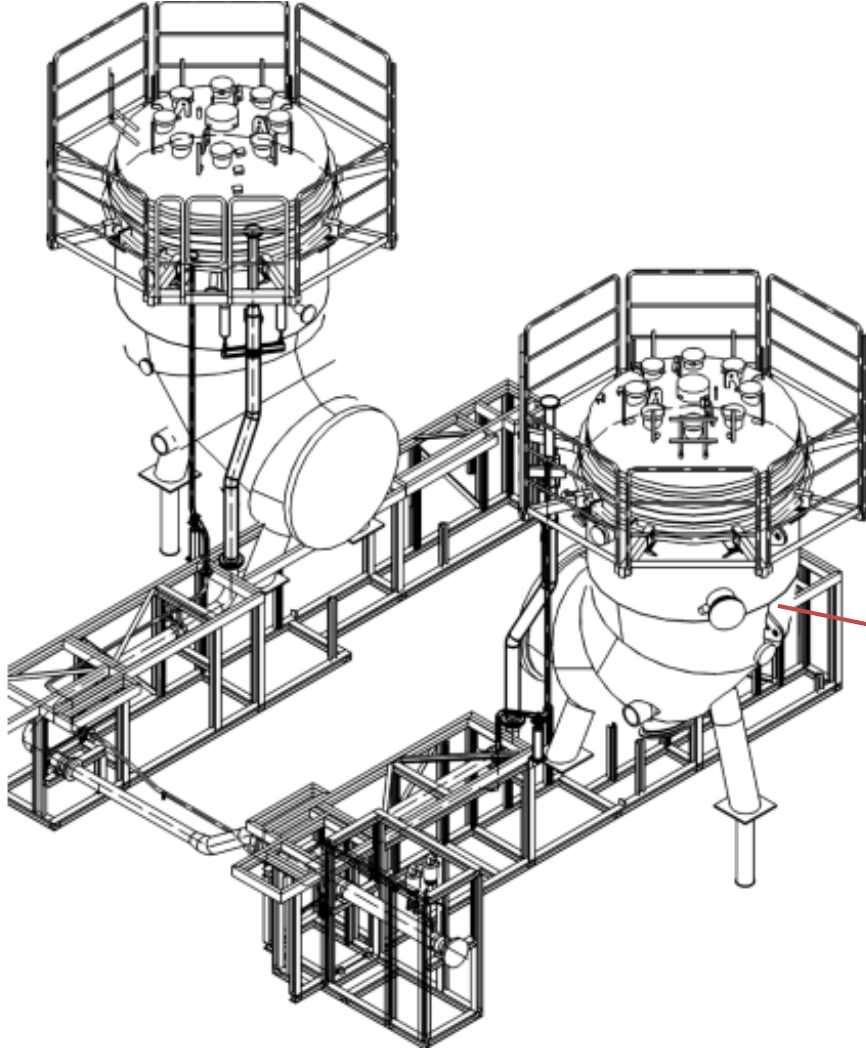
❖ محفظه احتراق (Combustion Chamber)

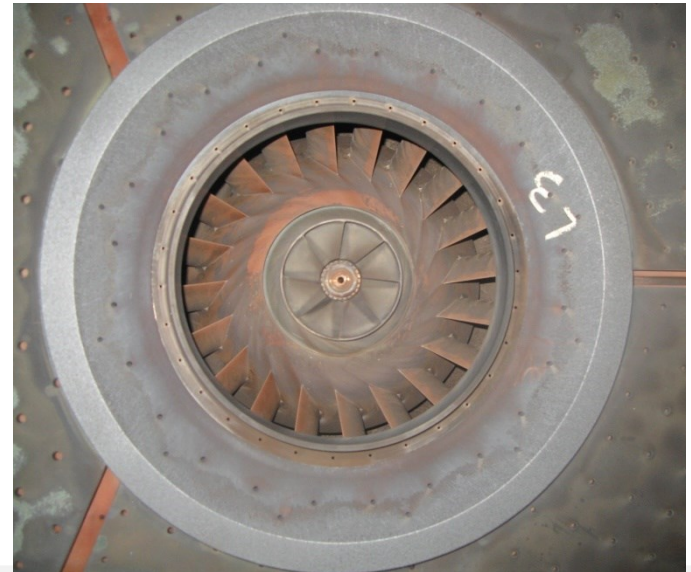
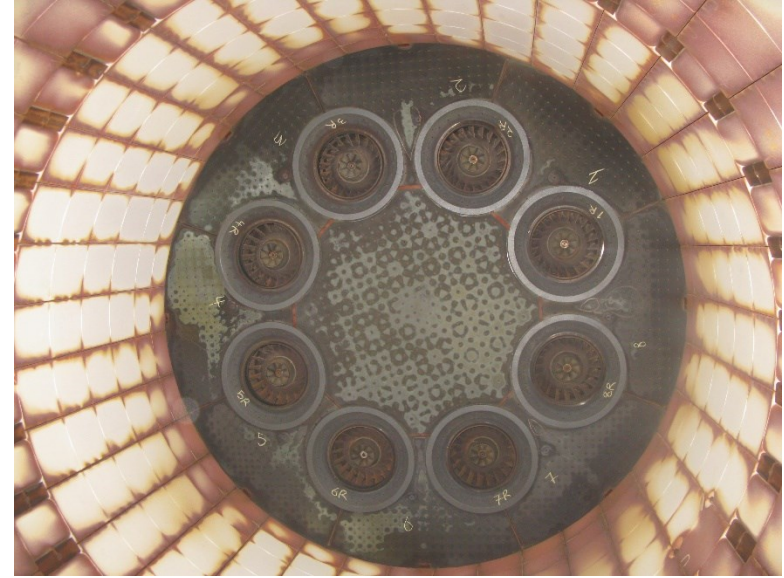
✓ نازل سوخت:



تجهیزات نیروگاه گازی (محفظه احتراق)

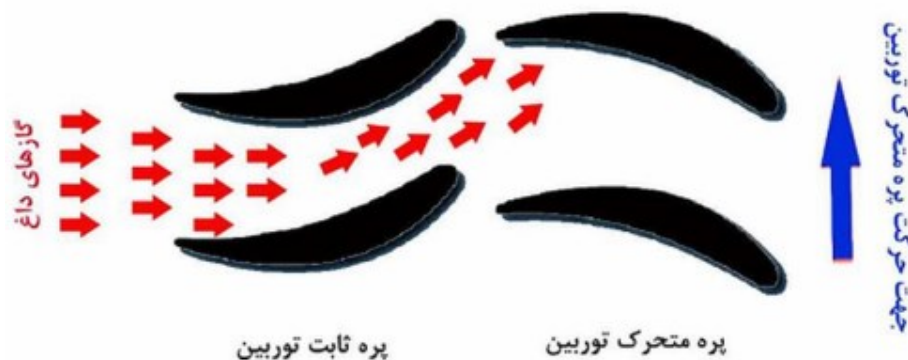
✓ در توربین های V94.2، دو محفظه عمودی احتراق وجود دارد:





تجهیزات نیروگاه گازی (توربین)

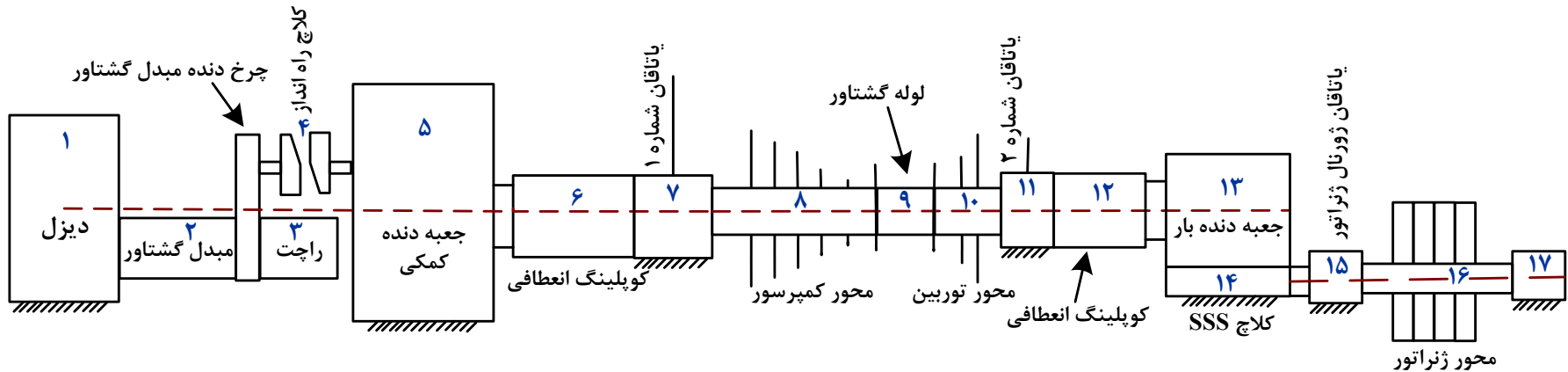
- ❖ توربین های گازی همانند توربین های بخاری، دارای دو نوع جریان محوری و شعاعی هستند (نوع جریان محوری کاربرد بیشتری دارد).
- ❖ در هر مرحله توربین، ابتدا پره های ثابت و سپس متحرک می باشند؛
- ❖ نیروهای وارد به پره ها: ۱- مماس بر دیسک (موجب دوران) ۲- شعاعی (دفع توسط اتصالات قوی بین پره و دیسک) ۳- محوری (دفع توسط یاتاقان تراست)
- ❖ وزن شافت در یک توربین گازی 160 MM V94.2 در حدود ۵۲ تن است؛
- ❖ دمای گاز احتراق ورودی به توربین گازی بسیار بالاست (در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد). این دما بسیار بالاتر از دمای بخار پس تافته ورودی به توربین های بخار است. بنابراین، تحمل پره های توربین گازی باید بالاتر باشد.
- ❖ همچنین، پره های توربین گازی شدیداً در معرض گازهای خورنده (مانند گوگرد، فسفر، سدیم و ...) هستند. بنابراین، استقامت در مقابل خوردگی توربین های گازی باید بیشتر از توربین های بخار باشد.





توربین V94.2: چهار مرحله ای

تجهیزات نیروگاه گازی (تجهیزات متصل به محور توربوژنراتور)



(۱) دیزل

- ✓ نقش محرک اولیه به منظور راه اندازی توربین گازی (دیزل ژنراتور).
- ✓ در برخی از نیروگاه ها برای محرک اولیه از الکتروموتور (که از شبکه سراسری برق دریافت می کند) و یا سیستم SFC (Static frequency converter)، استفاده می شود.
- ✓ به طور کلی، واحدهایی که بدون وابستگی برق شبکه می توانند راه اندازی شوند، **خودراه انداز (Black start unit)** نامیده میشوند.

(۲) مبدل گشتاور و چرخ دنده ی آن (Torque Converter)

- ✓ مبدل گشتاور اجازه می دهد تا دیزل بدون بار راه اندازی شود و به مرور که سرعت به دور نامی رسید گشتاور منتقل می گردد.
- ✓ چرخ دنده ی مبدل جهت اتصال به راجت و کلاچ راه انداز و همچنین افزایش گشتاور راه اندازی بکار می رود.

تجهیزات نیروگاه گازی (تجهیزات متصل به محور توربوژنراتور)

۳) راجت (Ratchet)

✓ در هنگام Trip توربین باید گردش آن تا زمان سرد شدن ادامه یابد تا از صدمات مکانیکی در اثر تنش های حرارتی جلوگیری شود (مثلا ۱۰۰ دور در دقیقه).

۴) کلاچ راه انداز

✓ جهت اتصال دیزل به توربین در هنگام راه اندازی

۵) جعبه دنده کمکی (Accessory Gear)

✓ برای گرانندن چند محور از طریق یک محور از جعبه دنده کمکی استفاده می شود. در زمان راه اندازی وظیفه انتقال قدرت از کلاچ راه انداز به توربین (تبدیل دور ۲۳۰۰ به ۵۱۰۰) و در حالت عادی وظیفه انتقال قدرت از توربین به پمپ روغن هیدرولیک، پمپ گازوییل، پمپ روغن یاتاقان ها و فن رادیاتور خنک کننده را برعهده دارد.

پنج تجهیز فوق سیستم راه اندازی توربین گازی را تشکیل می دهند.

نحوه راه اندازی:

- ✓ قبل از راه اندازی دیزل فرمان بسته شدن کلاچ راه انداز صادر می شود.
- ✓ با بسته شدن کلاچ و همزمان با استارت دیزل، روغن هم به داخل مبدل گشتاور جریان می یابد.
- ✓ ارتباط بین توربین و دیزل به گونه ایست که فقط دیزل می تواند توربین را بچرخاند و عکس آن امکانپذیر نیست.
- ✓ بین محور راجت و محور توربوژنراتور یک هرزگرد قرار دارد که باعث می شود فقط راجت بتواند محور را بگرداند و عکس آن امکانپذیر نیست.
- ✓ باز و بسته شدن کلاچ راه انداز توسط سیستم فنری با فشار روغن انجام می شود.

تجهیزات نیروگاه گازی (تجهیزات متصل به محور توربوژنراتور)

سایر تجهیزات متصل به محور توربوژنراتور:

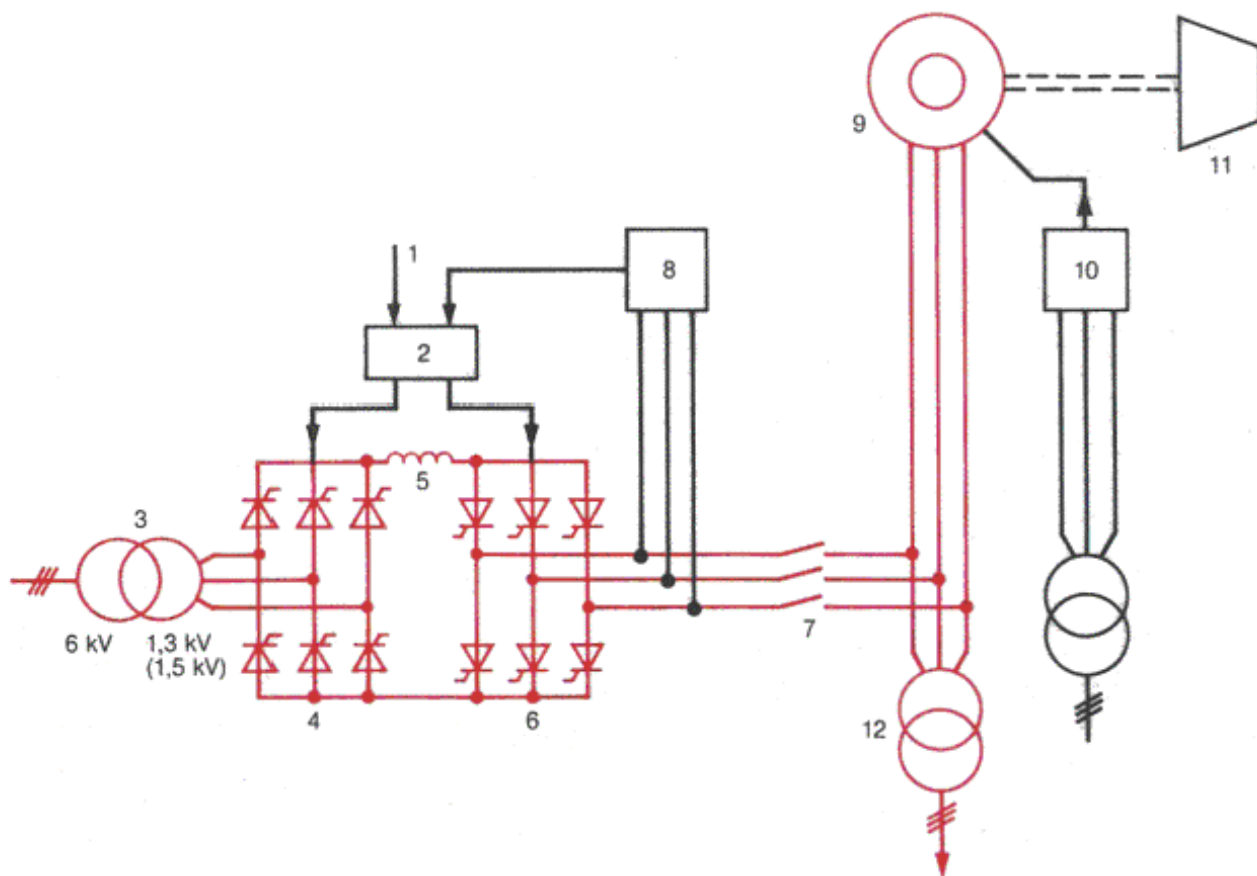
- ۶) کوپلینگ های انعطاف پذیر
- ۷) محفظه ی بیرینگ یا یاتاقان ۱ (Journal & Thrust Bearings)
- ۸) محور کمپرسور و توربین (Shaft)
- ۹) لوله گشتاوری (Torque Tube): رابط بین توربین و کمپرسور
- ۱۰) محور توربین
- ۱۱) محفظه ی یاتاقان ۲
- ۱۲) کوپلینگ انعطافی
- ۱۳) جعبه دنده ی بار (Load Gear): تبدیل دور از ۵۱۰۰ به ۳۰۰۰
- ۱۴) کلاچ عمل کننده ی خودکار (Synchro-self-shifting Clutch): جهت درگیری و جدایی توربین از ژنراتور
- ۱۵) یاتاقان ژورنال ژنراتور
- ۱۶) محور ژنراتور (روتور)
- ۱۷) یاتاقان دوم ژنراتور
- ۱۸) ژنراتور تحریک

نحوه راه اندازی واحد گازی با SFC (Static Frequency Converter) در شرایط بدون دیزل

- ❖ سیستم راه انداز SFC، مبدل فرکانسی پیشرفته‌ای است که با تبدیل ژنراتور سنکرون به موتور سنکرون در لحظات اولیه دورگیری مجموعه توربین و ژنراتور، تامین نیروی اولیه راه اندازی ژنراتور گاز را برعهده دارد. در واقع، در ابتدا با دریافت انرژی الکتریکی از شبکه برق، ژنراتور به عنوان یک موتور الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توربین گاز راه اندازی می‌شود.
- ❖ SFC ولتاژ AC ورودی را به ولتاژ DC تبدیل کرده و به منظور تطبیق فرکانس برق ورودی به ژنراتور به عنوان راه انداز، آن را مجدداً به AC با فرکانس مورد نیاز دور توربین در مراحل راه اندازی تبدیل می‌کند. در حقیقت، SFC یک مبدل AC/DC/AC است که فرکانس ورودی آن ۵۰ Hz و فرکانس خروجی آن از معمولاً از صفر تا ۳۵ Hz متغیر است.
- ❖ عملیات راه اندازی از دور صفر یا ترنینگ گیر با SFC آغاز شده و تا دور ۶۰۰ rpm با پاشش سوخت و برقراری شعله و افزایش شتاب گیری، همزمان با تولید انرژی مکانیکی در توربین ادامه پیدا می‌کند و نهایتاً، تا رسیدن به دور ۲۱۰۰ rpm توربین را همراهی می‌کند و سپس از مدار خارج می‌شود. پس از رسیدن توربین به دور نامی، ژنراتور به عنوان ژنراتور سنکرون، در مدار قرار می‌گیرد و وظیفه اصلی خود را که تولید انرژی الکتریکی است به عهده می‌گیرد.
- ❖ معمولاً به ازای هر دو واحد گازی یک سیستم SFC وجود دارد.
- ❖ ولتاژ ورودی SFC معمولاً ۱.۳ تا ۱.۵ kV و ولتاژ لینک DC حدود ۱.۵ kV است.

نحوه راه اندازی واحد گازی با SFC در شرایط بدون دیزل

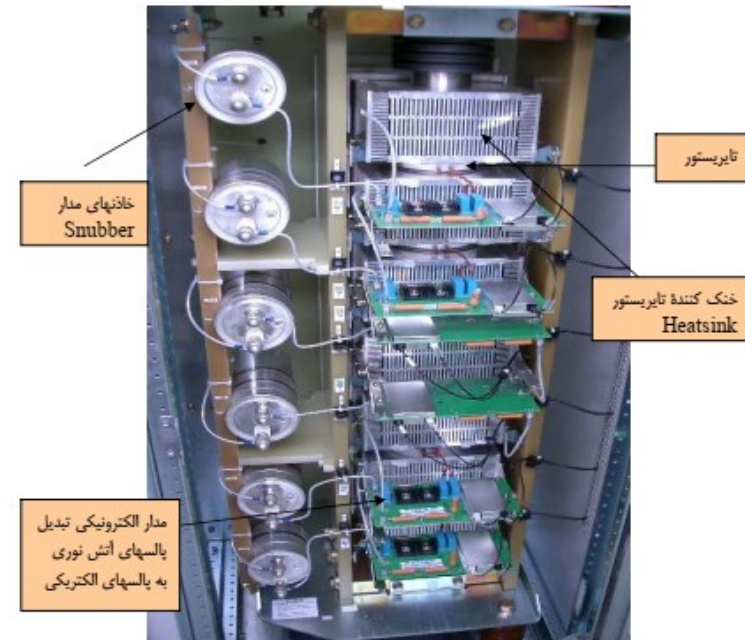
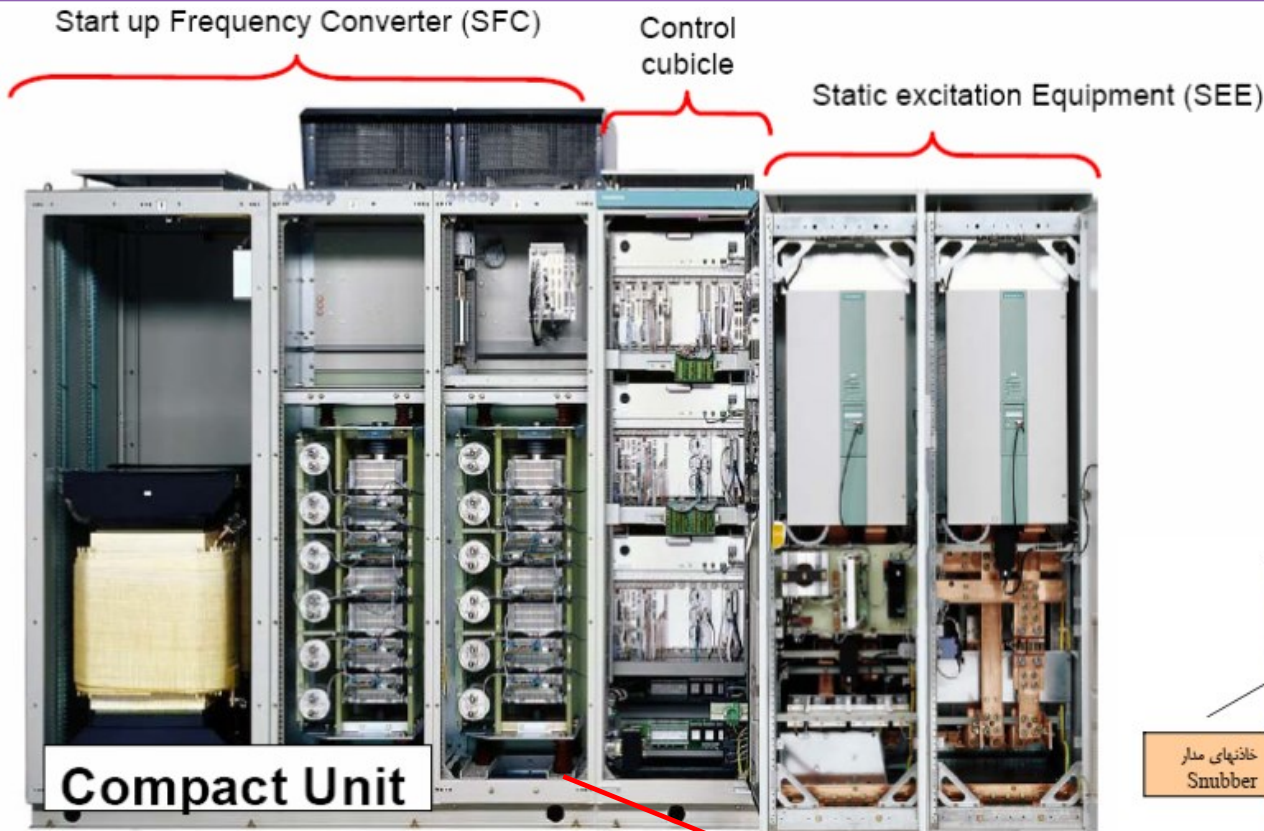
❖ مدل مفهومی SFC در نیروگاه گازی:



- 1 Control, signals
- 2 Control regulation
- 3 Supply transformer
- 4 Mains converter
- 5 Link choke
- 6 Machine converter
- 7 Isolator
- 8 Voltage detection
- 9 Synchronous machine
- 10 Excitation
- 11 Gas turbine
- 12 Block transformer

نحوه راه اندازی واحد گازی با SFC در شرایط بدون دیزل

❖ SFC در نیروگاه گازی:



نحوه راه اندازی واحد گازی با SFC در شرایط بدون دیزل

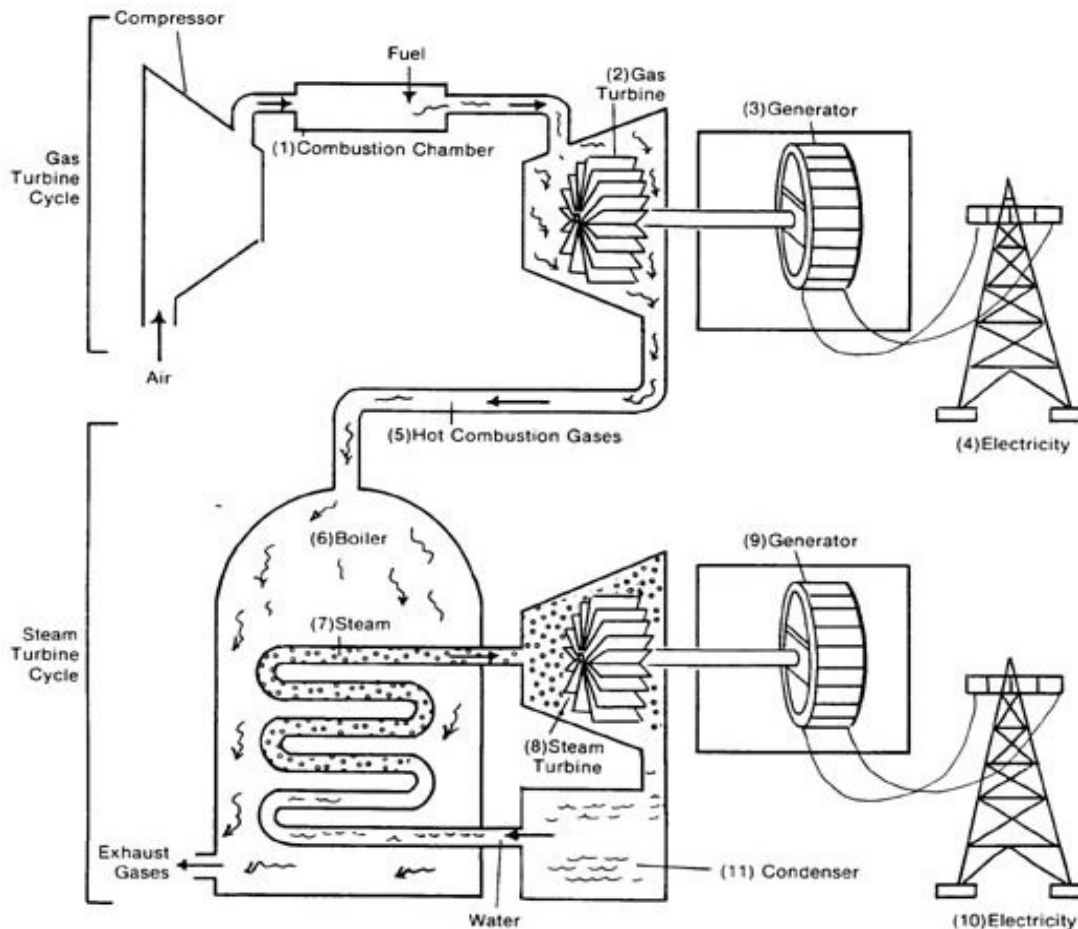


ترانس SFC و اجزای آن

راکتور DC سیستم SFC



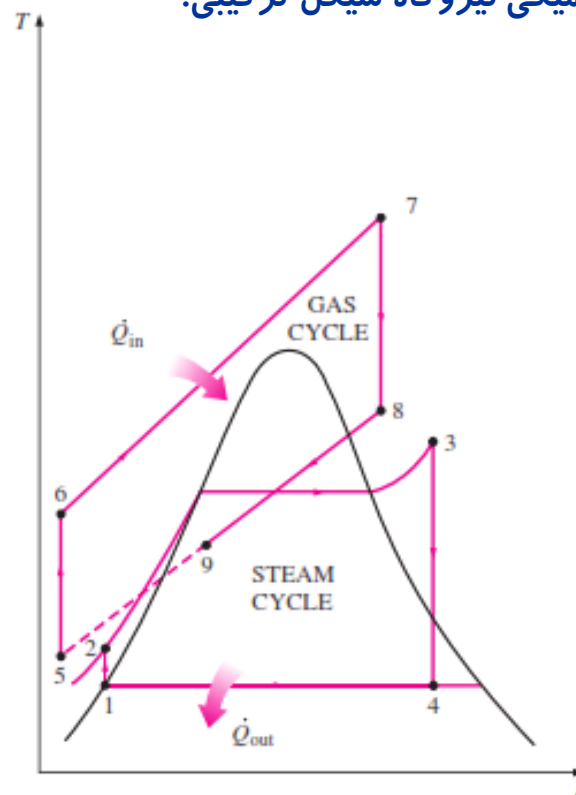
- ❖ راندمان نیروگاه گازی به خاطر تلفات حرارتی بالای آن پایین است.
- ❖ دمای هوای خروجی از توربین بیش از ۵۰۰ درجه سانتیگراد است.
- ❖ مبدل بازیاب باعث افزایش راندمان نیروگاه گازی می شود ولی هزینه ثابت نیروگاه را افزایش می دهد.
- ❖ بهترین راه جهت افزایش راندمان بدون افزایش هزینه ها استفاده از انرژی بسیار زیاد موجود در گازهای خروجی از توربین گازی جهت استفاده در سیکل بخار است.



❖ مزایای نیروگاه سیکل ترکیبی

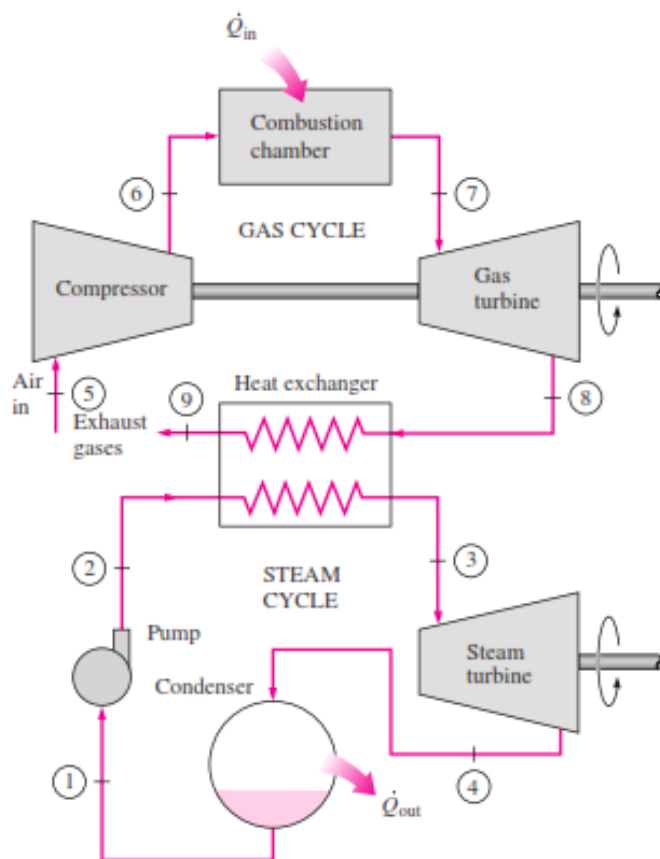
- ✓ افزایش راندمان سیکل بخار و گاز
- ✓ انعطاف پذیری در تولید
- ✓ راه اندازی سریع قسمتی از تولید
- ✓ مناسب برای تامین بار پایه

❖ سیکل ترمودینامیکی نیروگاه سیکل ترکیبی:



❖ معایب نیروگاه سیکل ترکیبی

- ✓ وابستگی تولید واحدهای بخاری به واحدهای گازی
- ✓ تفاوت طول عمر دو نوع واحد



❖ راندمان نیروگاه سیکل ترکیبی

✓ حرارت داده شده به کل سیکل در دو قسمت محفظه ی احتراق و دیگ بخار بازیاب صورت می گیرد.

✓ با فرض q_1 و q_2 حرارت داده شده به سیکل و w_1 و w_2 کار انجام شده توسط سیکل باشد و همچنین η_g و η_s راندمان نیروگاه های گازی و بخاری باشد:

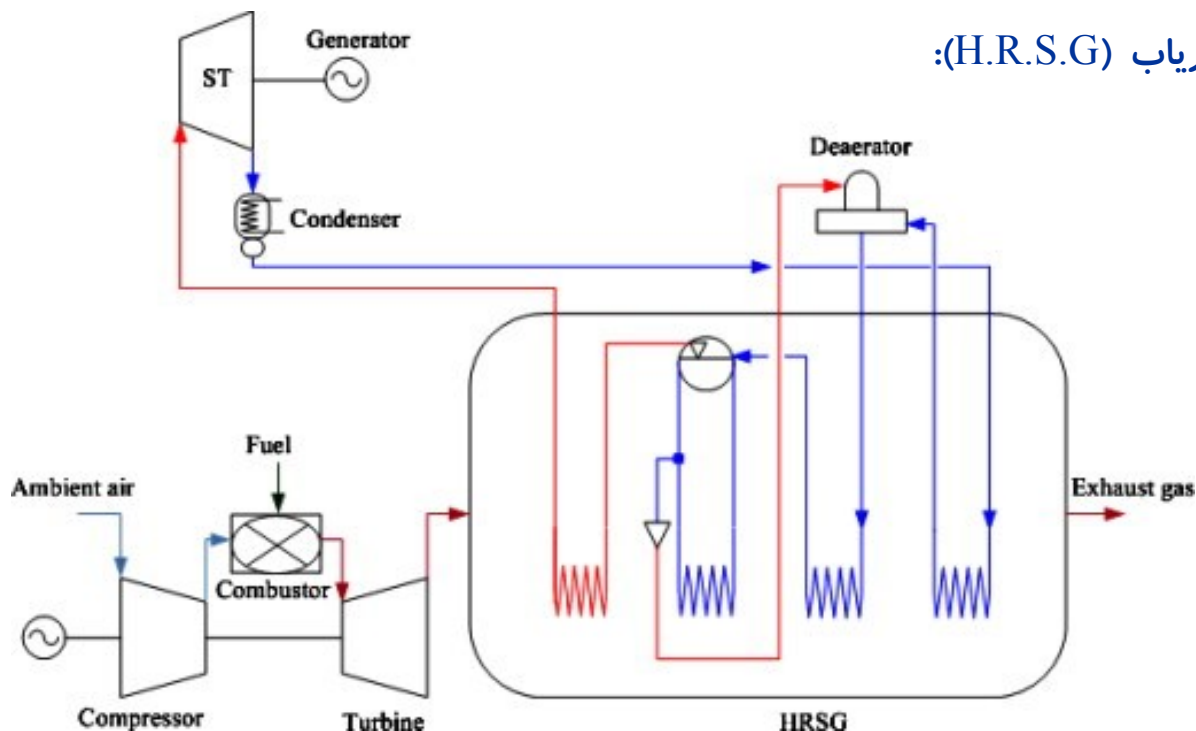
$$\eta_{cs} = \frac{w_1 + w_2}{q_1 + q_2} = \frac{\eta_g \cdot q_1 + [(q_1 - q_1 \cdot \eta_g) + q_2] \cdot \eta_s}{q_1 + q_2}$$

$$\eta_{cs} = \eta_s + \frac{q_1 \cdot \eta_g \cdot (1 - \eta_s)}{q_1 + q_2}$$

❖ نیروگاه سیکل ترکیبی با دیگ بخار بازیاب (Heat Recovery Steam Generator):



❖ نیروگاه سیکل ترکیبی با دیگ بخار بازیاب (H.R.S.G):



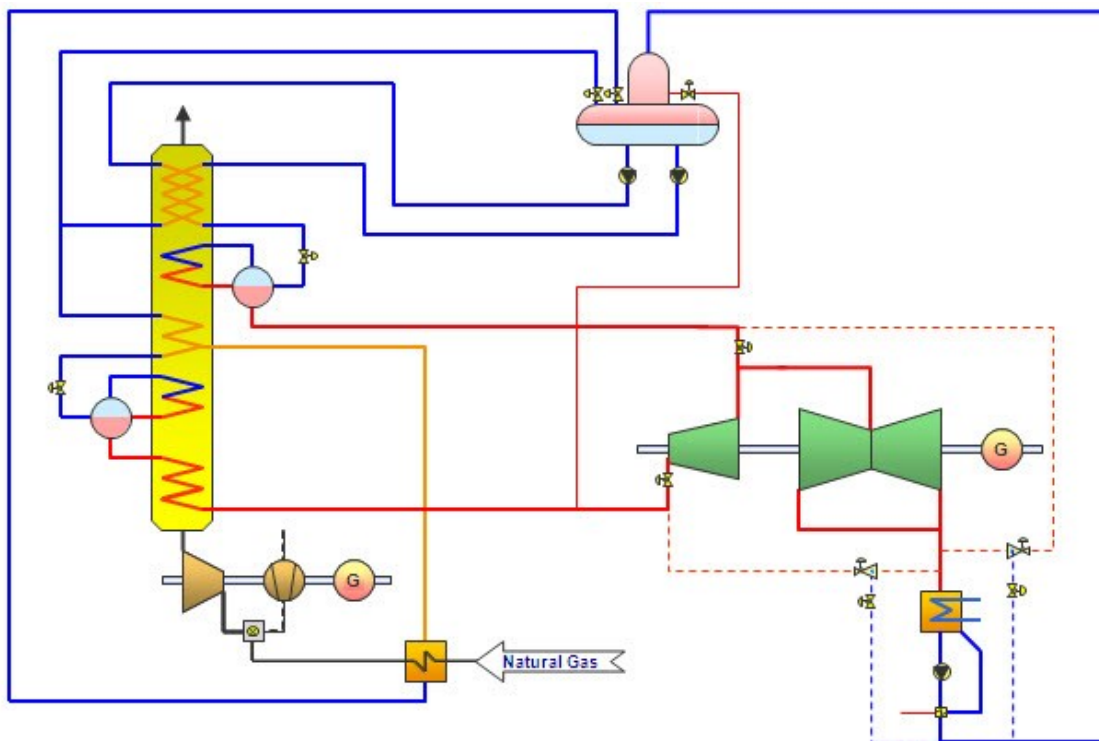
- ✓ نیروگاه های سیکل ترکیبی کوچک نیازی به مشعل اضافی ندارند. در این حالت قدرت خروجی نیروگاه بخاری تقریباً نصف قدرت خروجی نیروگاه گازی است.
- ✓ در این حالت، واحدهای گازی $\frac{2}{3}$ و واحدهای بخاری $\frac{1}{3}$ قدرت نیروگاه را تامین می کنند.
- ✓ نیروگاه های سیکل ترکیبی بزرگ مجهز به مشعل اضافی هستند. این کار موجب افزایش مقدار بخار تولید شده، دما و فشار بخار سوپر هیت و در نتیجه افزایش قدرت و راندمان سیکل می گردد.
- ✓ در این حالت، سهم قدرت تولیدی هر قسمت تقریباً طور مساوی تقسیم می شود.

❖ انواع نیروگاه سیکل ترکیبی از نظر فشار کارکرد

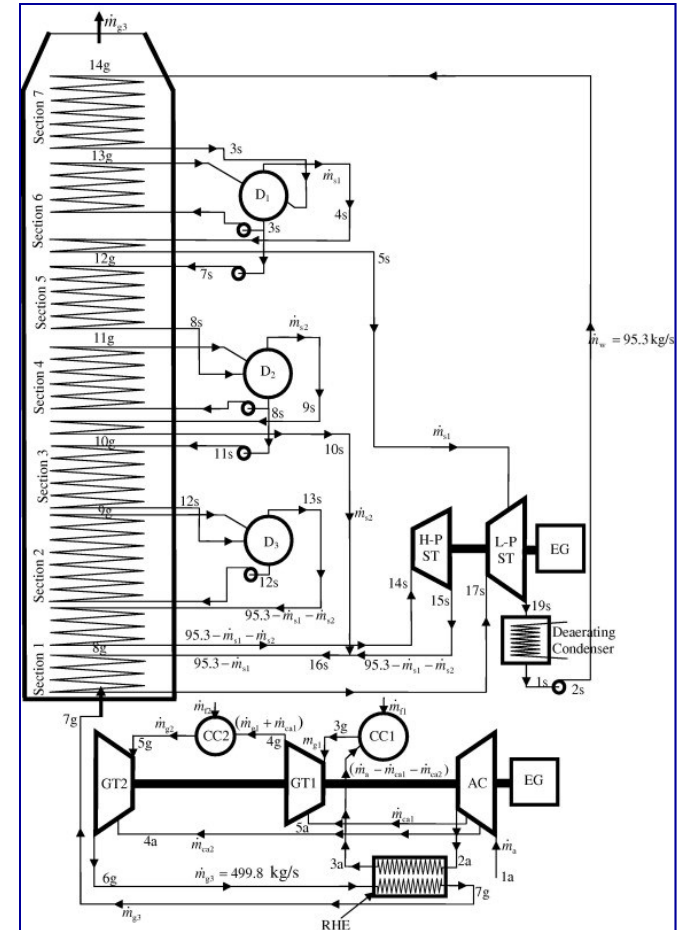
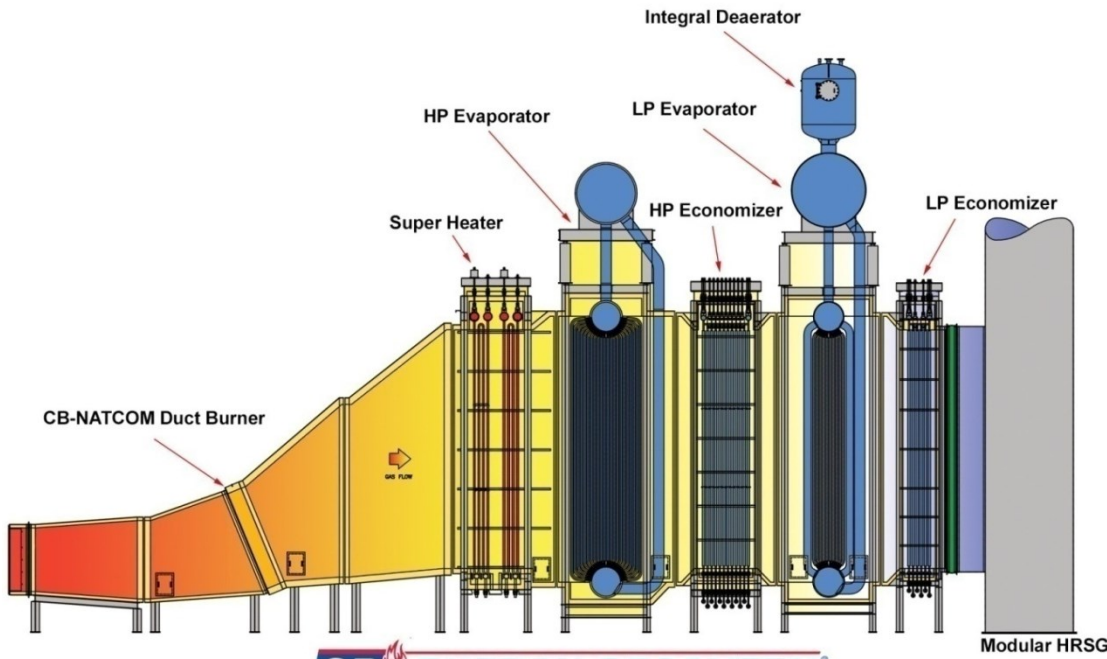
(۱) نیروگاه تک فشاره

(۲) نیروگاه دو فشاره:

- ✓ تقسیم مسیر بخار به دو قسمت با سطوح فشار متفاوت
- ✓ افزایش راندمان
- ✓ استفاده از چند واحد گازی متصل به یک بویلر بازیاب به منظور افزایش فشار و دما



Modular HRSG



❖ دمای شکست (Pinch Point)

- ✓ نقطه ی شکست منحنی تغییرات دما در نقطه ورودی سیال به اواپراتور
- ✓ هرچه تفاوت بین دمای سیال ورودی به اواپراتور و دمای گازهای موجود در دیگ بخار کمتر باشد بازده انتقال حرارت می یابد.

