# فهرست

فصل۳ : نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی
۳-۱- مقدمه ..... 4
۳-۲- سیکل قدرت گازی ..... 6
۳-۲-۱- مقدمه ..... 6
۳-۲-۲- سیکل استاندارد برایتون ..... 9
۳-۲-۳- بازده سیکل برایتون ..... 10
۳-۲-۴- سیکل برایتون با عمل بازیاب ..... 11
۳-۲-۵- سیکل برایتون با مبدل بازیاب و تراکم چند مرحله ای ..... 13
۳-۲-۶- سیکل برایتون با مبدل بازیاب و انبساط چند مرحله ای ..... 14
۳-۲-۷- سیکل برایتون توربین گازی با تراکم و انبساط چند مرحله ای و عمل بازیاب ..... 15
۳-۳- تجهیزات نیروگاه گازی ..... 16
۳-۳-۱- مقدمه ..... 16
۳-۳-۲- کمپرسور ..... 17
۳-۳-۲-۱- کمپرسور محوری ..... 19
۳-۳-۲-۲- کمپرسور گریز از مرکز ..... 20
۳-۳-۳- بازیاب ها ..... 21

۳-۳-۴- محفظه احتراق ..... 21
۳-۳-۵- توربین گازی ..... 24
۳-۳-۶- تجهیزات متصل به محور توربوژنراتور نیروگاه گازی ..... 25
۳-۳-۷- راه اندازی توربین گازی ..... 26
۳-۳-۸- نحوه ی تغییرات گشتاور در زمان راه اندازی ..... 28
۳-۴- نیروگاه چرخه ترکیبی ..... 29
۳-۴-۱- مقدمه ..... 30
۳-۴-۲- نیروگاه های چرخه ترکیبی با دیگ بخار بازیاب ..... 32
۳-۴-۳- محاسبات بازده نیروگاه چرخه ترکیبی ..... 37
۳-۵- سوالات مروری ..... 38
منابع مآخذ .....

# فصل ۳
# نیروگاه های گازی و چرخه ترکیبی

## ۳-۱- مقدمه

یکی دیگر از نیروگاه های کاربردی در شبکه قدرت ، نیروگاه های گازی می باشند که در ایران تا سال ۱۳۸۵ حدود ۳۲/۹٪ کل تولید را برعهده داشته اند.
سیال این نیروگاه ها هوای محیط است و برپایه یک سیکل باز کار میکند. تجهیزات اساسی این سیکل ( کمپرسور ، محفظه احتراق و توربین ) می باشد که نسبت به نیروگاه های بخار از تجهیزات بسیار کمتری استفاده می کنند. این نیروگاه ها بیشتر در بار پیک شبکه ها استفاده می شود.
در ایران تعداد نیروگاه ها ی گازی بسیار زیاد است که از مهمترین آنها می توان به واحدهای ری ، سنندج ، جنوب اصفهان ، بوشهر ، شیروان ، شیراز ، چابهار ، شریعتی ، مشهد و شهید سلیمی نکا اشاره نمود.
در این فصل ابتدا سیکل ترمودینامیکی گازی بیان و سپس به تجهیزات اساسی و جانبی می پردازیم.

نیروگاه های گازی دو مشکل اساسی دارند :
۱- بازده کم
۲- تلفات حرارتی زیاد (ناشی از هوای داغ خارج شده از توربین گازی)

با توجه به این مشکلات استفاده از نیروگاه چرخه ترکیبی مفید به نظر می رسد.
نیروگاه های چرخه ترکیبی از دو سیکل گازی و بخاری تشکیل شده اند .
می توان از هوای داغ خروجی از توربین گازی در تولید بخار برای به چرخش در آوردن توربین بخار استفاده نمود که در نتیجه بازده نیروگاه نسبت به نیروگاه گازی بهبود می یابد.
مهمترین نیروگاه های چرخه ترکیبی ایران : نیروگاه های کازرون ، گیلان ، منتظر قائم کرج ، قم ، شهید رجایی قزوین ، فارس ، شریعتی مشهد و نیشابور می باشند.

جدول (۴-۱): مشخصات نیروگاه‌های گازی کشور (در سال ۱۳۸۵)

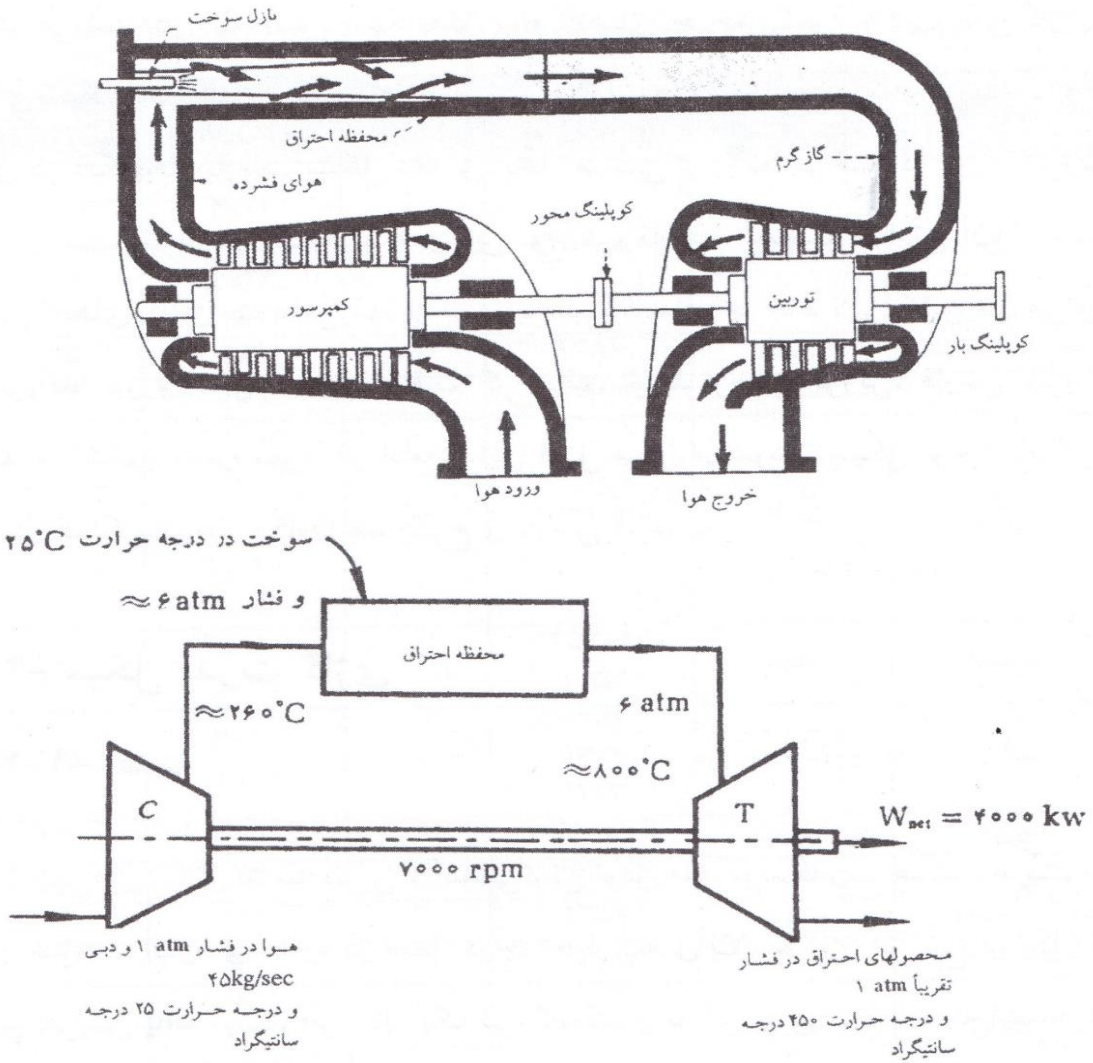
| نیروگاه | محل جغرافیایی | زمان بهره‌برداری | تعداد واحدها | قدرت نامی هرواحد MW | مجموع تولید MW |
|---|---|---|---|---|---|
| ری | ری | ۱۳۵۶-۵۷ | ۳۷ | ۷×۳۲<br>۵×۲۴<br>۳×۸۵<br>۶×۳۲<br>۱۶×۲۳٫۷ | ۱۱۷۰٫۲ |
| جنوب اصفهان | اصفهان | ۱۳۸۴ | ۵ | ۱۵۹ | ۷۹۵ |
| سنندج | سنندج | ۱۳۸۴-۸۵ | ۴ | ۱۵۹ | ۶۳۶ |
| شیراز | شیراز | ۱۳۴۶-۶۰ | ۸ | ۱×۶۰٫۸<br>۲×۲۶٫۵<br>۱×۲۵<br>۱×۲۸٫۵<br>۱×۱۱٫۸<br>۲×۱۵ | ۲۰۹٫۱ |
| مشهد | مشهد | ۱۳۵۳-۶۳<br>۱۳۵۷ | ۴ | ۲×۱۸٫۵<br>۲×۷۹ | ۱۹۵ |
| کنگان | کنگان | ۱۳۷۴<br>۱۳۷۴<br>۱۳۷۴ | ۷ | ۶×۲۵<br>۱×۱۴ | ۱۶۴ |
| شیروان | شیروان | ۱۳۶۱-۶۴ | ۶ | ۲۵ | ۱۵۰ |
| شریعتی | مشهد | ۱۳۶۳-۶۴ | ۶ | ۲۵ | ۱۵۰ |
| کنارک (چابهار) | چابهار | ۱۳۵۷ | ۶ | ۲۳٫۷ | ۱۴۲٫۲ |
| شهید مدحج | اهواز | ۱۳۵۴-۷۷ | ۴ | ۳۲ | ۱۲۸ |
| زاهدان | زاهدان | ۷۴و۱۳۶۶ | ۵ | ۱×۲۵<br>۱×۲۴٫۸<br>۳×۲۴٫۴۶ | ۱۲۳٫۱۸ |
| یزد | یزد | ۱۳۷۷ | ۲ | ۶۰ | ۱۲۰ |
| شهید بهشتی | لوشان | ۱۳۵۶ | ۲ | ۶۰ | ۱۲۰ |
| کیش | کیش | ۱۳۷۰-۸۵ | ۲<br>۱<br>۲ | ۳۷٫۵<br>۲۴٫۵<br>۴۷ | ۱۴۶٫۲۵ |

## ۳-۲- سیکل قدرت گازی

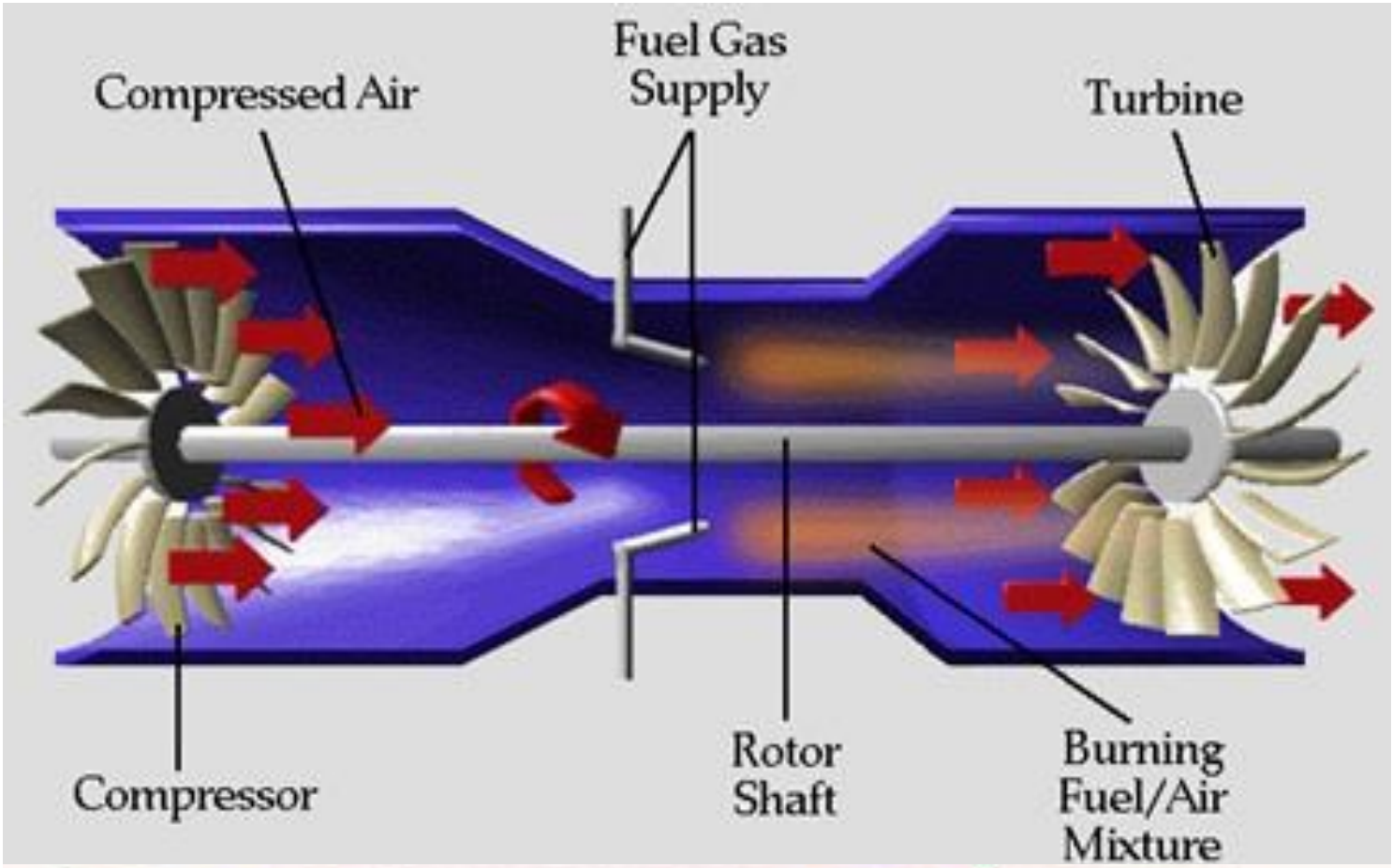
### ۳-۲-۱- مقدمه

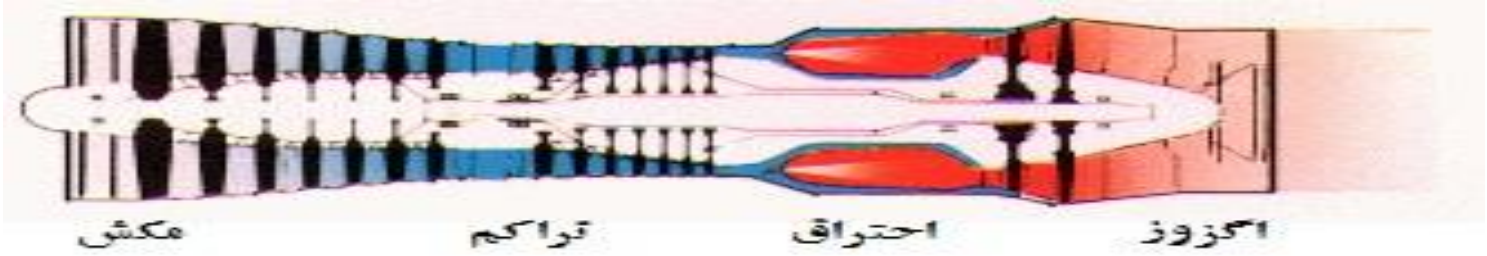
توربین های گازی از ساده ترین و ابتدایی ترین موتورهای مولد قدرت هستند که با پیشرفت صنعت بازده این نیروگاه ها افزایش یافته است.

در نیروگاه های گازی ابتدا هوا با دما و فشار محیط به طور پیوسته وارد کمپرسور می شود ، کمپرسور هوا را متراکم (تحت یک تحول آدیاباتیک) و به محفظه احتراق می فرستد. با پاشش سوخت واحتراق آن هوای عبوری از محفظه احتراق تحت فشار ثابت گرم می شود ، به این ترتیب هوای خروجی از محفظه احتراق دارای فشار و درجه حرارت بالایی است که انرژی جنبشی و پتانسیل بسیار زیادی دارد و با عبور از پره های ثابت و متحرک توربین محور کمپرسور و ژنراتور توربین را به چرخش در می آورد.




شکل (۴-۱): سیکل توربین گازی نمونه [۱]

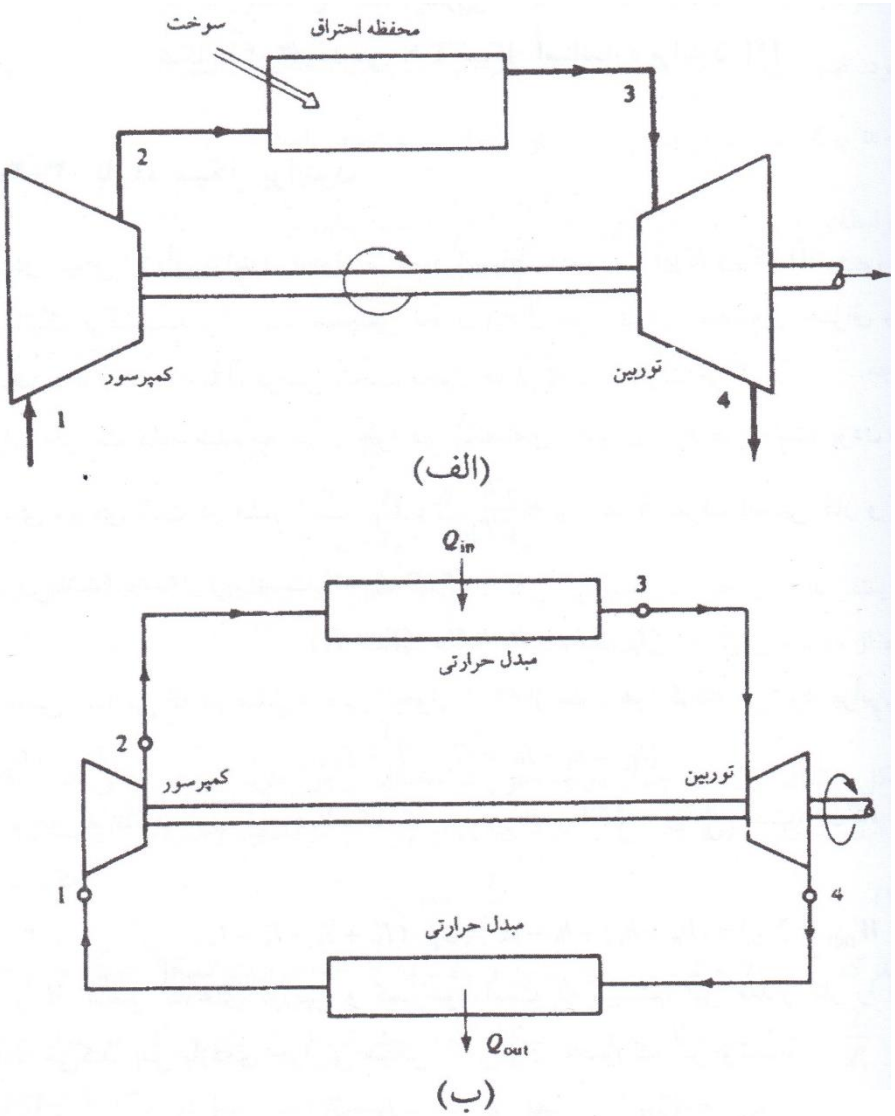

Compressed Air
Fuel Gas Supply
Turbine
Compressor
Rotor Shaft
Burning Fuel/Air Mixture


مکش
تراکم
احتراق
اگزوز

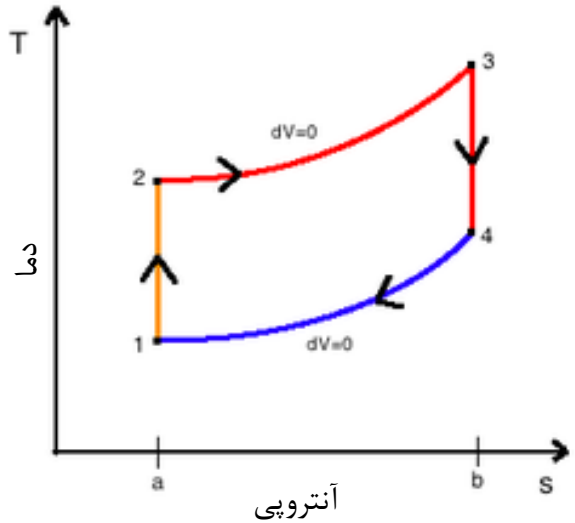
پره های متحرک
توربین گازی

## ۳-۲-۲- سیکل استاندارد برایتون

دراین سیکل به جای تحول احتراق در محفظه احتراق یک تحول انتقال حرارت در نظر گرفته می شود. هوای این سیکل را گازی کامل در نظر می گیریم و تحول های تراکم و انبساط را برگشت پذیر فرض می کنیم. ارزش این سیکل استاندارد آن است که می توان اثر بعضی از متغییر ها را روی کارکرد سیکل به طور کلی و کیفی مورد مطالعه قرار داد.




سیکل توربین گازی، الف) سیکل واقعی؛ ب) سیکل استاندارد برایتون[۲]



## ۳-۲-۳- بازده سیکل برایتون

در سیکل استاندارد برایتون تحول تراکم انبساط ایزونتروپیک است. همچنین تحول انتقال حرارت در محفظه احتراق و تحول دریافت حرارت در مبدل وقتی تحت تحول فشار ثابت قرار میگیرد.

بازده حرارتی سیکل با بیشتر شدن افزایش فشار ، افزایش می یابد ، که باعث افزایش درجه حرارت سیال ورودی به توربین می شود.

مقاومت پره های توربین باید در مقابل درجه حرارت بیشتر شود و به همین علت نمی توان $T_3$ را به دلخواه افزاش داد.

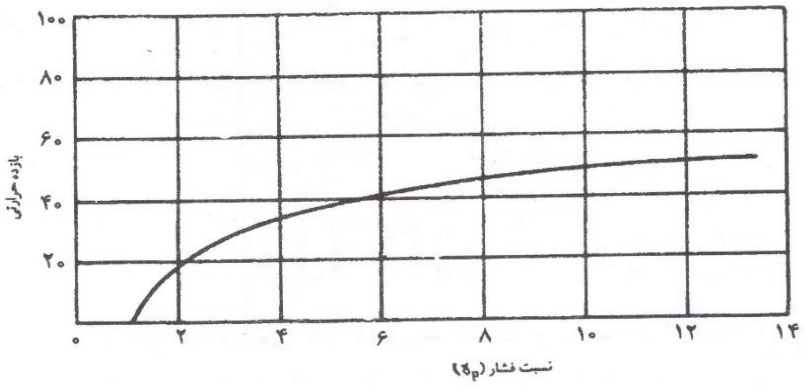
با وجود ازدیاد حرارتی سیکل ، کار تولید شده به ازای واحد هوا که سیکل را طی میکند ، کمترخواهد بود .

برای بالا بردن سیکل گازی برایتون راه های مختلفی وجود دارد:

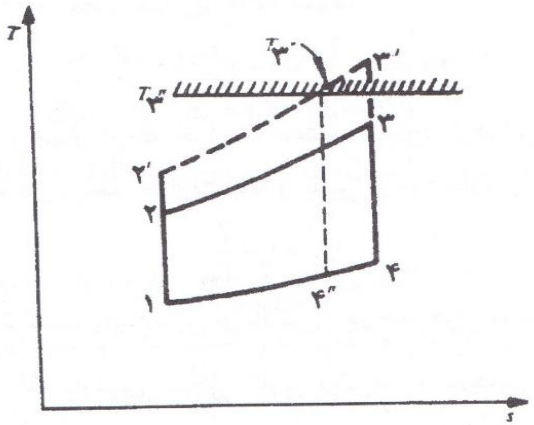
۱- سیکل توربین گازی با عمل بازیاب

۲- سیکل توربین گازی با تراکم چند مرحله ای

۳- سیکل توربین گازی با انبساط چند مرحله ای




شکل (۴-۴): تغییرات بازده‌ی حرارتی یک سیکل برایتون بر حسب نسبت فشار [۳]

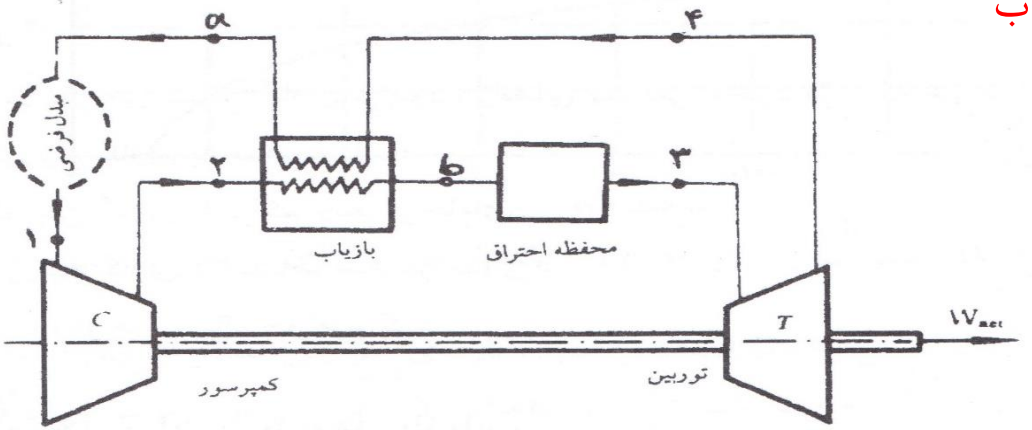



اثرات حداکثر درجه حرارت سیال ورودی به توربین بر روی بازده‌ی سیکل

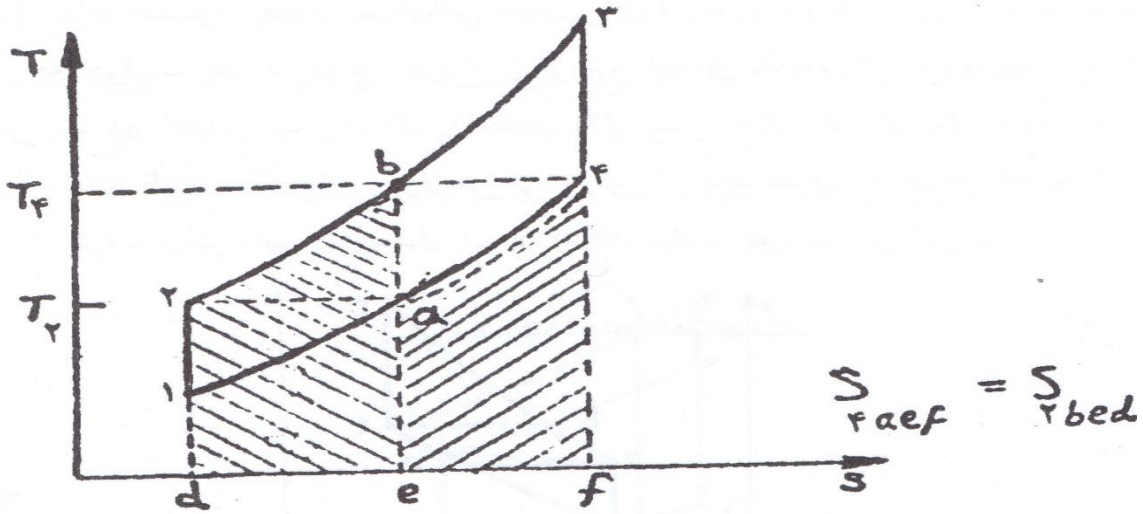
## ۳-۲-۴- سیکل برایتون با عمل بازیاب

به منظور بالا بردن بازده حرارتی توربین گازی باید از هوای گرم خارج شده از توربین استفاده کنیم.
بر اساس منحنی ، درجه حرارت گاز در موقع خروج از توربین به مراتب بیشتر از درجه حرارت در انتهای عمل تراکم است.

حال اگر از یک مبدل حرارتی استفاده کنیم و گازهای خروجی از توربین در یک طرف و گازهای خارج شده از کمپرسور از طرف دیگر وارد این مبدل شوند امکان تبادل حرارت وجود دارد .




شکل (۴-۷): سیکل توربین گازی با عمل بازیاب




شکل (۴-۸): منحنی T-S سیکل برایتون با عمل بازیاب

از نظر تئوری اگر مبدل حرارتی به اندازه کافی بزرگ باشد و جریان سیال به آرامی برقرار شود آنگاه هوای خروجی از کمپرسور در یک تحول برگشت پذیر تا دمای $T_2$ در حالت ''b'' گرم میشود .

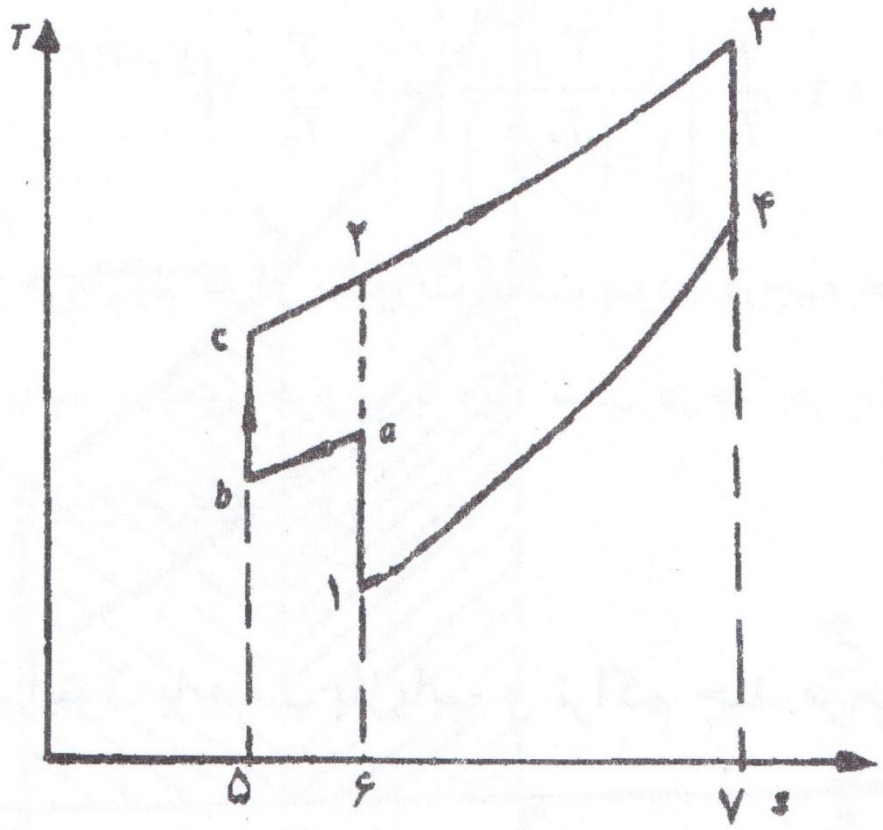
بازده حرارتی سیکل بازیاب با فرض اینکه مبدل حرارتی دارای سیکل برگشت پذیر باشد برابر است با :

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_A} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_4} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3}\left[\frac{\left(T_2/T_1\right) - 1}{1 - \left(T_4/T_3\right)}\right] = 1 - \frac{T_1}{T_3} \cdot \gamma_P^{(K-1)/K}$$

## ۳-۲-۵- سیکل برایتون با مبدل بازیاب و عمل تراکم چند مرحله ای

به منظور صرفه جویی در کار کمپرسور لازم است تا عمل تراکم در آن چند مرحله ای انجام شود. به این معنی که ابتدا هوای محیط وارد کمپرسور فشار ضعیف شود تا فشار هوا به مقدار مناسبی افزایش یابد. افزایش فشار باعث افزایش دما خواهد شد سپس هوای خروجی از کمپرسور اول پس از خنک شدن وارد کمپرسور با فشار زیاد شود.

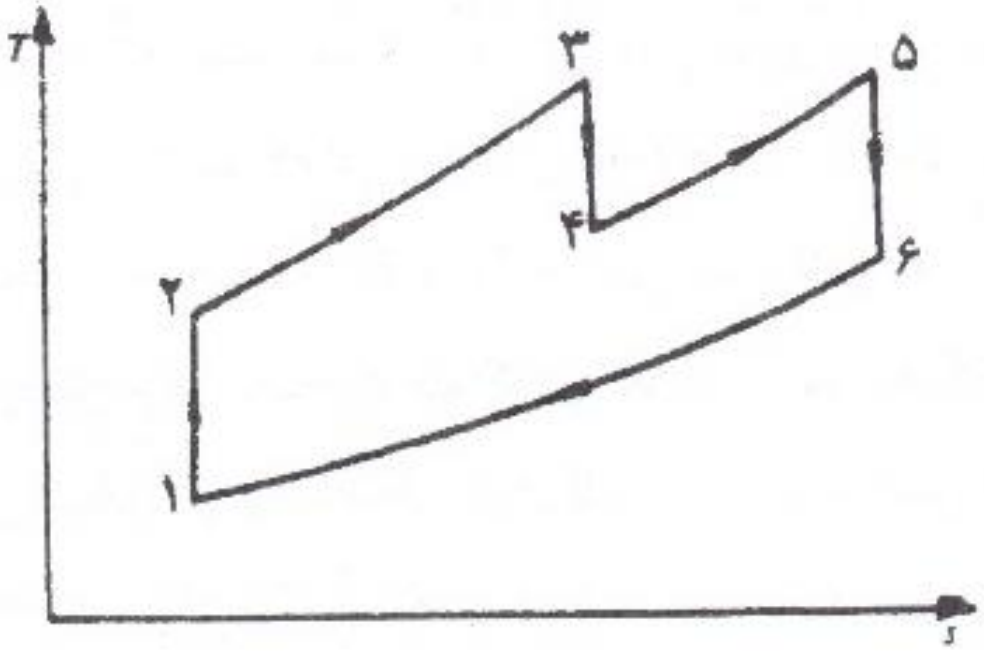



شکل (۴-۹): اثر سرد کردن گاز ما بین مراحل تراکم در سیکل توربین گازی

## ۳-۲-۶- سیکل برایتون با مبدل بازیاب و انبساط چند مرحله ای

یکی دیگر از تغییرات سیکل برایتون استفاده از دو توربین به جای یک توربین است که در این حالت یکی ازتوربین ها برای گرداندن کمپرسور و دیگری برای تولید کار مفید خارجی می باشد.

بهتر است انبساط گاز در دو مرحله انجام گیرد و در بین آنها گاز در یک فشار ثابت تا درجه حرارت اول خود گرم شود.

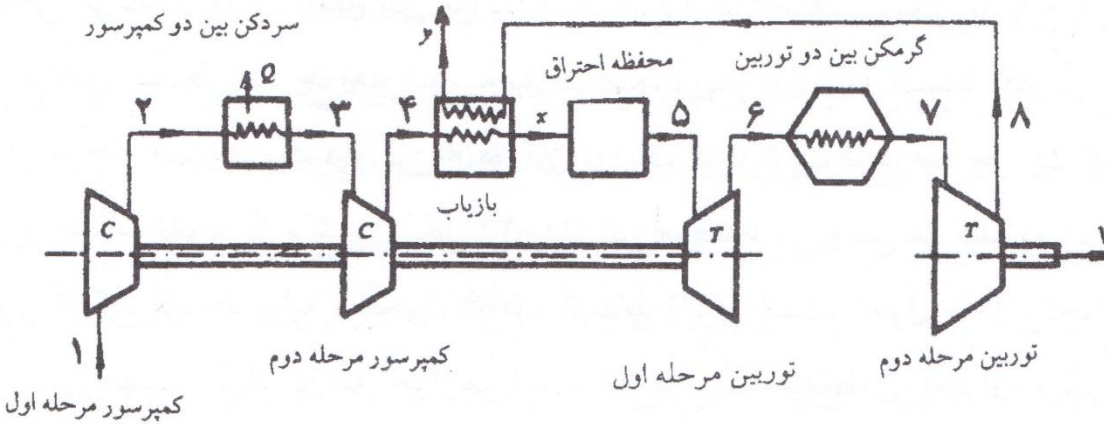



اثر گرم کردن گاز ما بین مراحل انبساط در سیکل توربین گازی

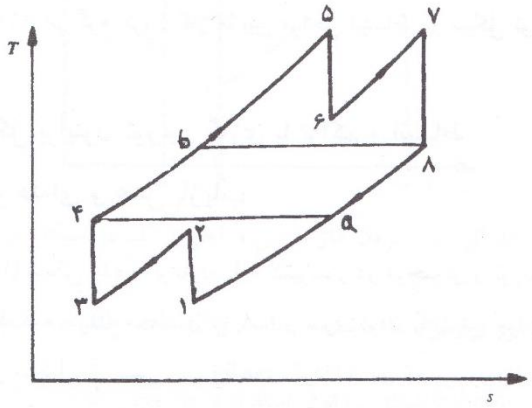
## ۳-۲-۷- سیکل برایتون با توربین گازی با تراکم و انبساط چند مرحله ای و عمل بازیاب

در این سیکل توربین اول وظیفه ی گرداندن دو کمپرسور را برعهده دارد و توربین دوم کار خالص خروجی سیکل را مهیا میکند.

حداکثر بازده این سیکل همگامی است که نسبت فشار ها در دو کمپرسور و دوتوربین یکی می باشد. در عمل ممکن است تعداد توربین ها در یک نیروگاه گازی بزرگ از دو دستگاه هم بیش تر شود.




شکل (۴-۱۱): سیکل برایتون با کمپرسور دو مرحله‌ای، توربین دو مرحله‌ای و عمل بازیاب [۳]

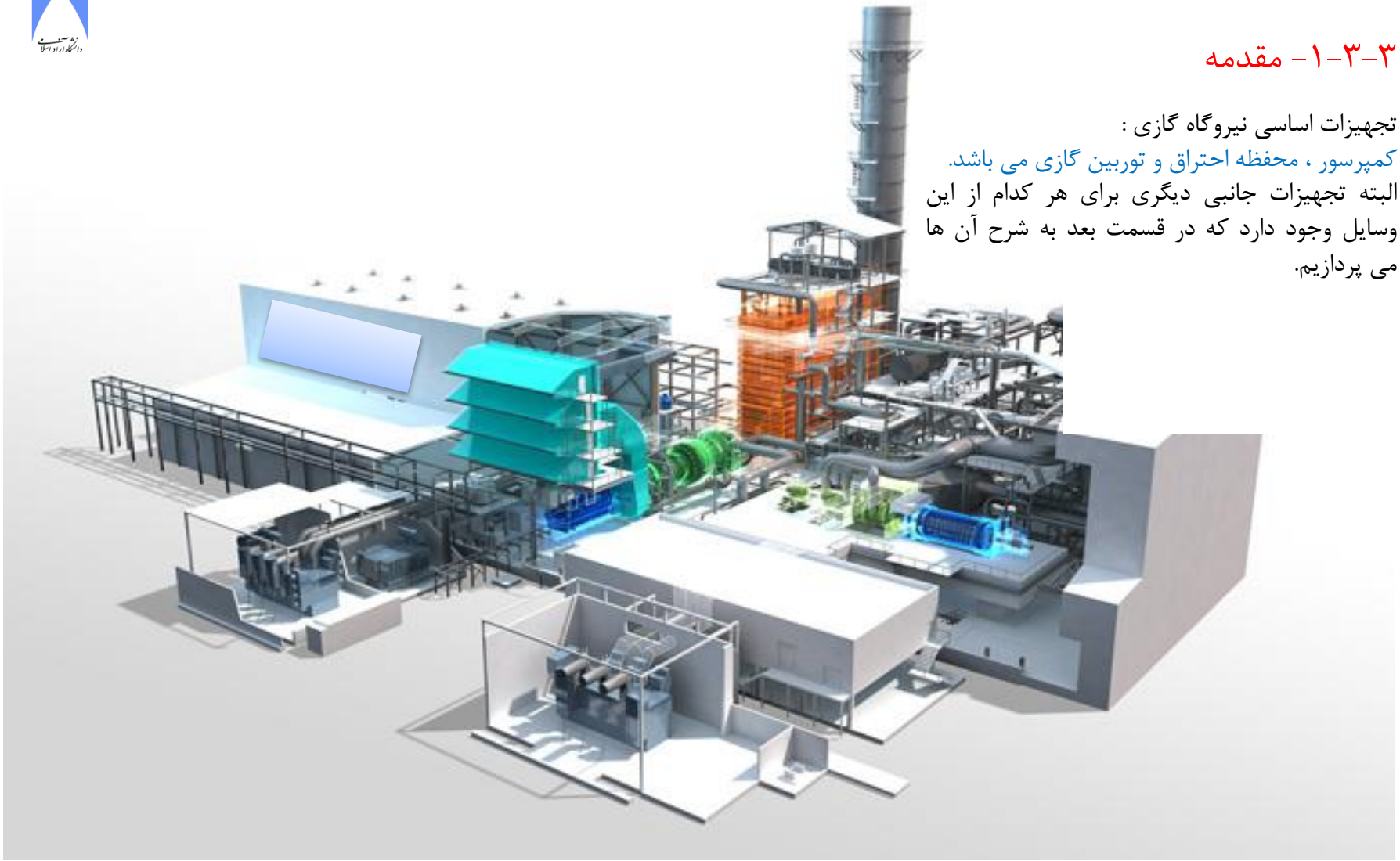


شکل (۴-۱۲): منحنی کامل سیکل برایتون (ارائه شده در شکل (۴-۱۱)) [۳]

# ۳-۳- تجهیزات نیروگاه گازی

## ۳-۳-۱- مقدمه

تجهیزات اساسی نیروگاه گازی :
کمپرسور ، محفظه احتراق و توربین گازی می باشد.
البته تجهیزات جانبی دیگری برای هر کدام از این وسایل وجود دارد که در قسمت بعد به شرح آن ها می پردازیم.



## ۳-۳-۲- کمپرسور

وسایلی هستند که با مکش هوا به درون خود ، فشار آن را افزایش می دهند .

دو نوع کمپرسور محوری و گریز از مرکز در نیروگاه مورد استفاده قرار می گیرند که البته در نیروگاه های گازی عموماً از کمپرسور محوری استفاده می شود.

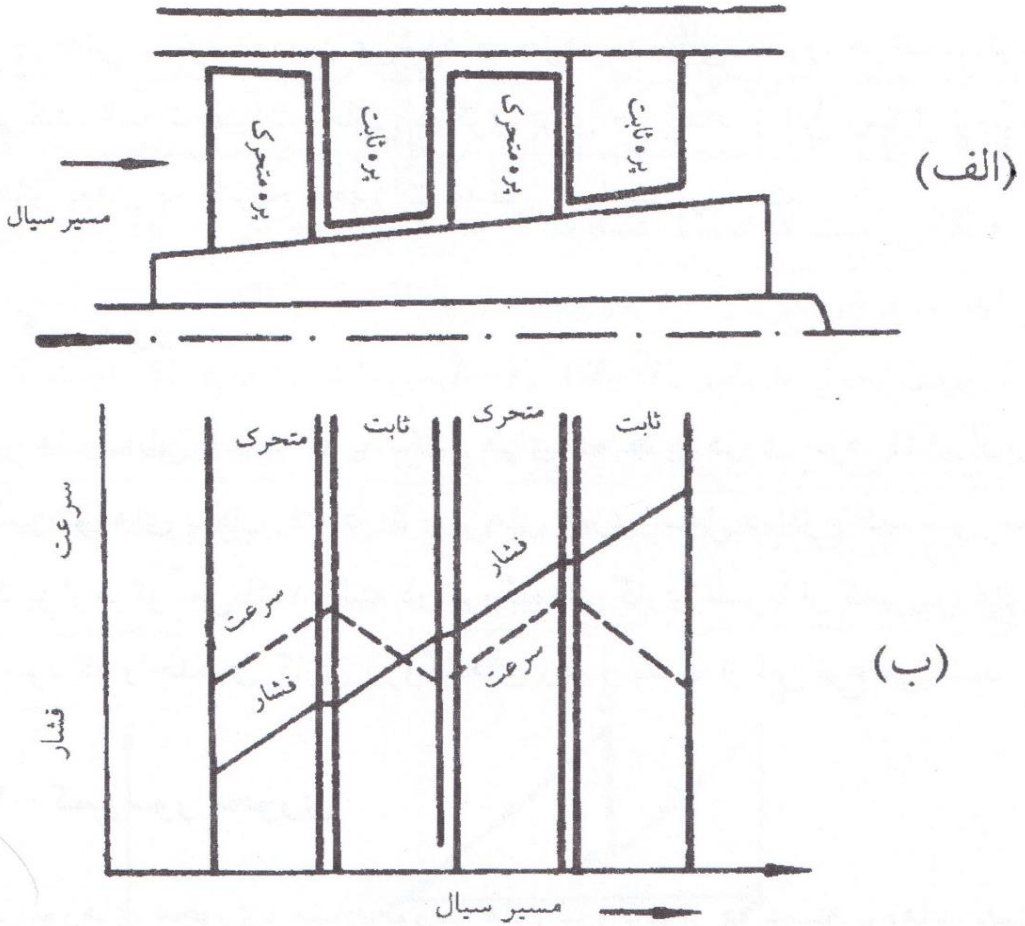
### ۳-۳-۲-۱- کمپرسور محوری

در کمپرسور محوری از دو دسته پره های ثابت و پره های متحرک استفاده می شود .

ابتدا سیال هوا توسط ردیفی از پره های متحرک شتاب می گیرد و سپس عمل پخش کردن هوا به وسیله پره های ثابت انجام می شود .

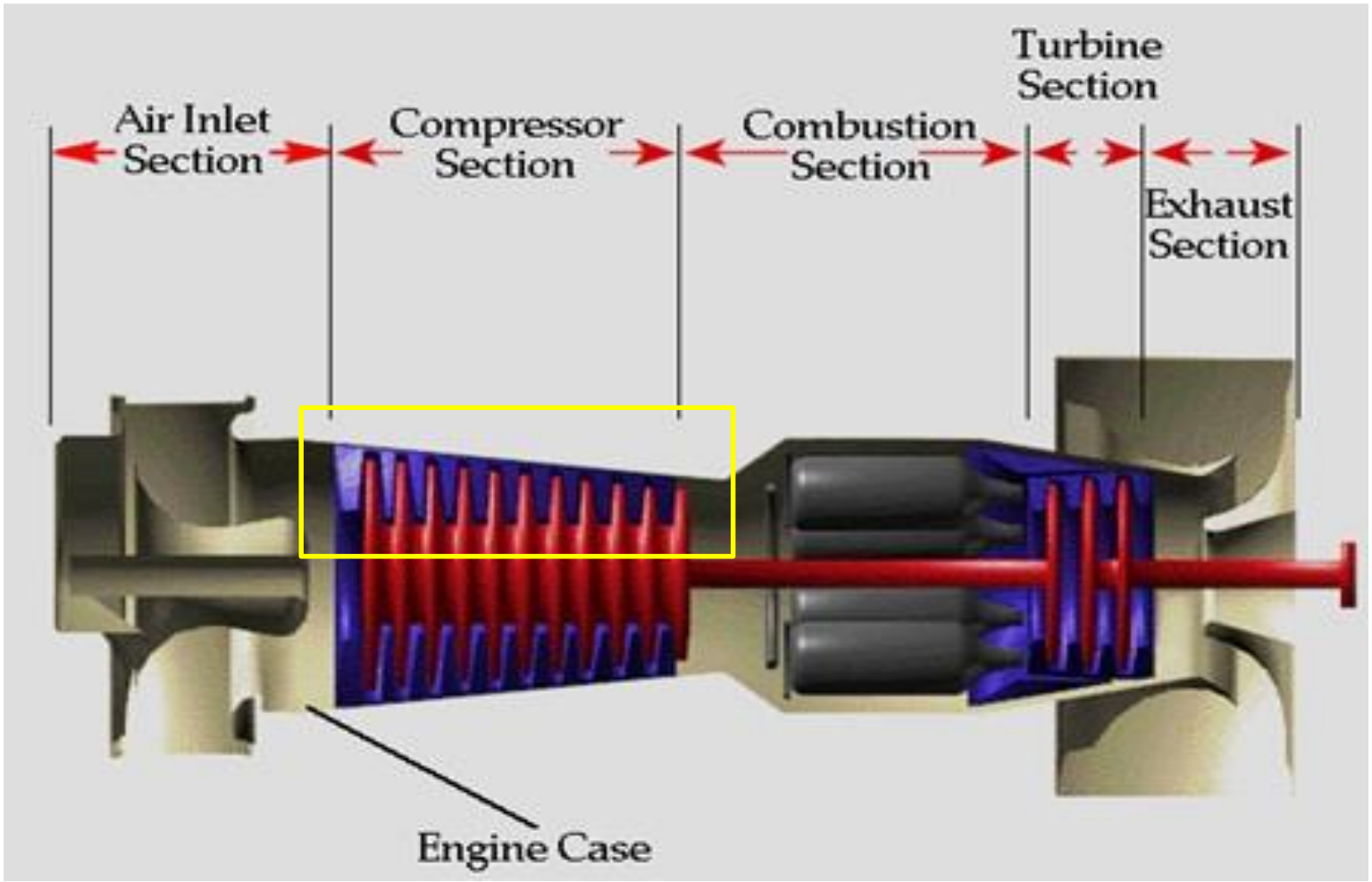
پره ثابت علاوه بر ایجاد زاویه مناسب ، خاصیت پخش کنندگی نیز خواهند داشت .

مشخص است که وظیفه پره های ثابت عکس پره های متحرک است.



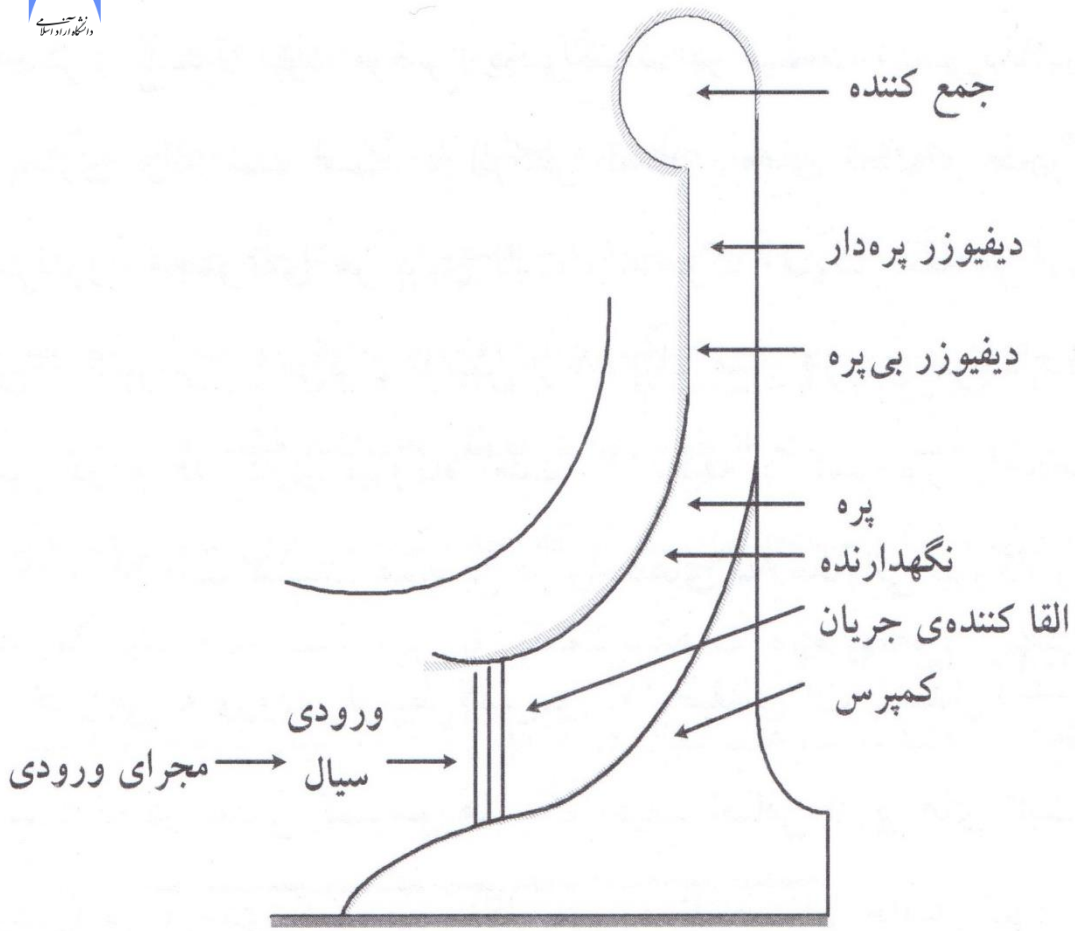

شکل (۴-۱۳): یک کمپرسور دوار محوری، الف) طرح کلی؛
ب) نحوه‌ی تغییرات فشار و سرعت در پره‌ها

# پره های ثابت و متحرک

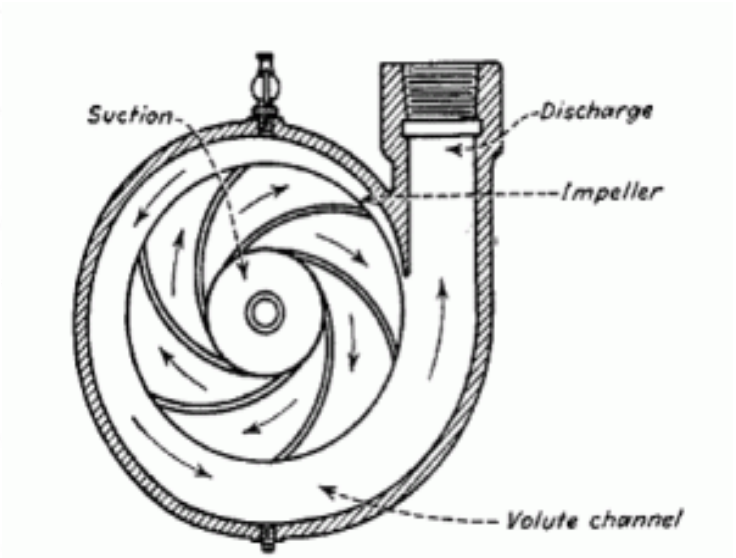


## ۳-۳-۲-۲- کمپرسور گریز از مرکز

در این کمپرسور هوا در جهت محوری وارد کمپرسور شده در جهت شعاعی از آن خارج می شود و سپس وارد پخش کننده می گردد.هوا از راه ورودی مکیده می شود و در اثر نیروی گریز از مرکز سرعت آن زیاد می گردد تا با برخورد به بدنه ی خروجی کمپرسور سرعت سیال هوا تبدیل به فشار شود . بازده این کمپرسور اندکی کمتر از نوع محوری است ولی طیف کاربرد آن وسیع تر است.

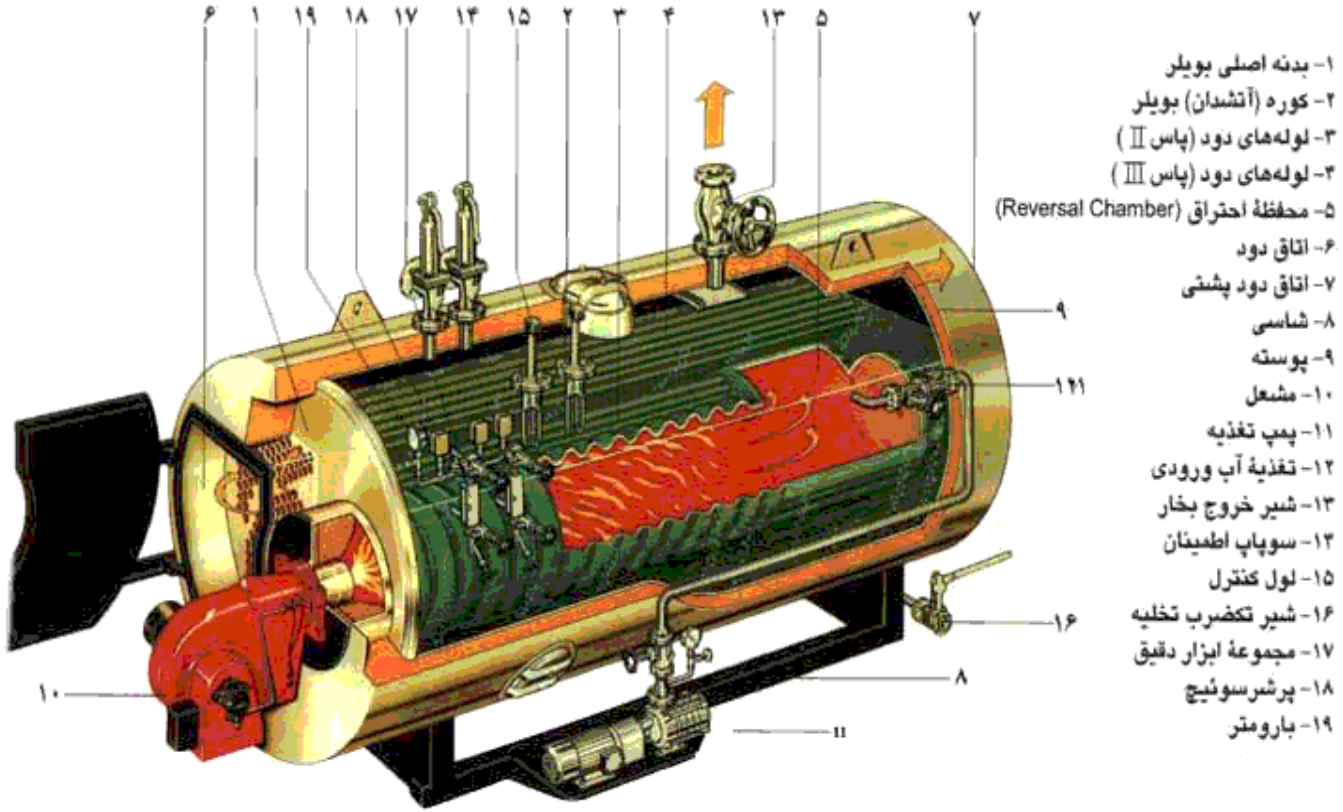



شکل (۴-۱۴): طرح کلی کمپرسور گریز از مرکز



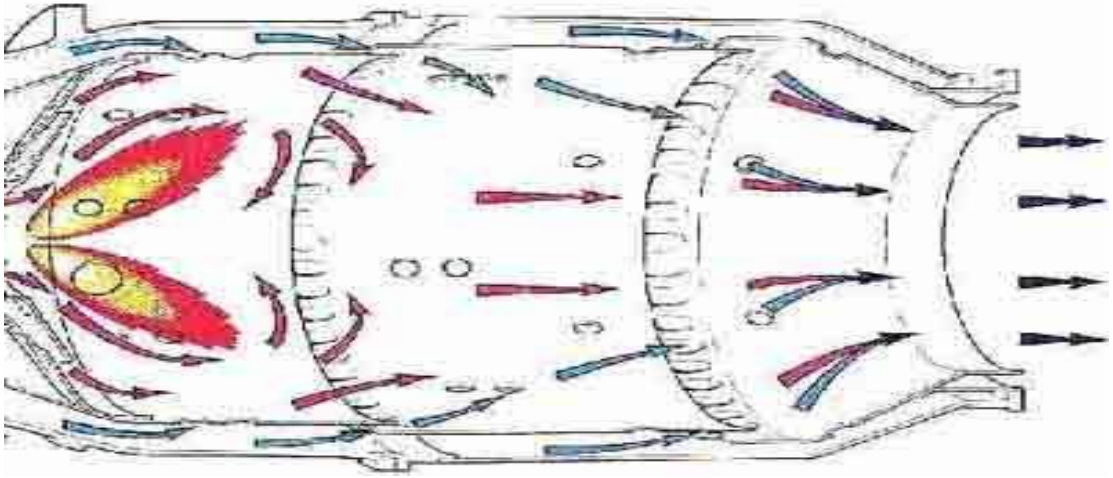
## ۳-۳-۳- بازیاب ها

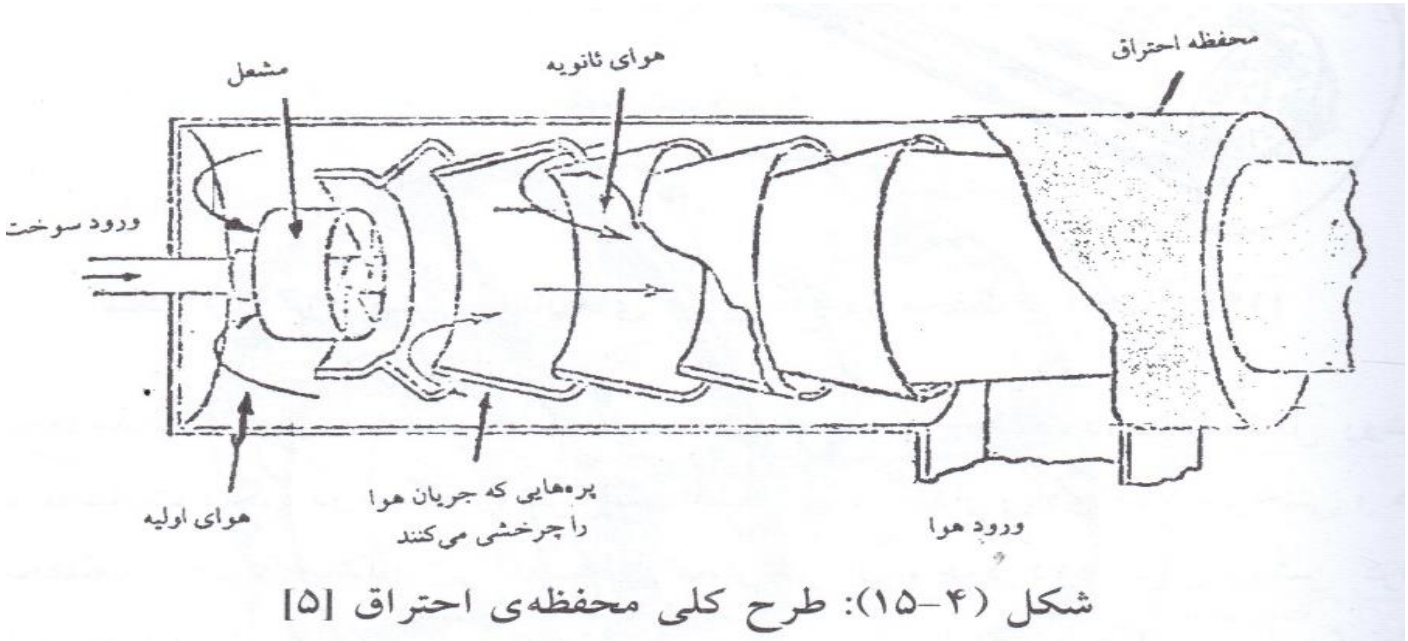
در نیروگاه گازی با قدرت بالا به کارگیری بازیاب الزامی است .
با کاربرد بازیاب ها ، بازده سیکل، بالا می رود و در نتیجه استفاده از انرژی مربوطه را بیش تر ممکن می سازد. در توربین های گازی هوای تازه وارد فیلتر ورودی می شود و در کمپرسور تا حدود ۶۸atm و درجه حرارت ۲۶۰ درجه سانتی گراد متراکم می گردد سپس راهی بازیاب می شود تا در آنجا بیشتر گرم شود وقتی گاز در توربین انبساط می یابد درجه حرارتش به حدود ۵۳۸ درجه سانتی گراد و فشار آن به فشار محیط می رسد و دوباره این گاز به بازیاب می رود تا حرارت تلف شده را به هوای ورودی بدهد.



## ۳-۳-۴- محفظه احتراق

تنها وظیفه آن بالا بردن درجه حرارت هوای فشرده شده خروجی از بازیاب است. در محفظه احتراق مقدار کمی مواد سوختی با هوای فشرده مخلوط می شود و در اثر سوختن گاز حرارت تولید می گردد مقدار کمی از هوا از راه سوراخ های اطراف مشعل با سوخت مخلوط می شود که اصطلاحاً به این هوا ، هوای اولیه می گویند . این هوا برای روشن نگه داشتن مشعل کافیست مابقی هوای ورودی از سوراخ های مجرای داخلی وارد قسمت اصلی احتراق می شود .



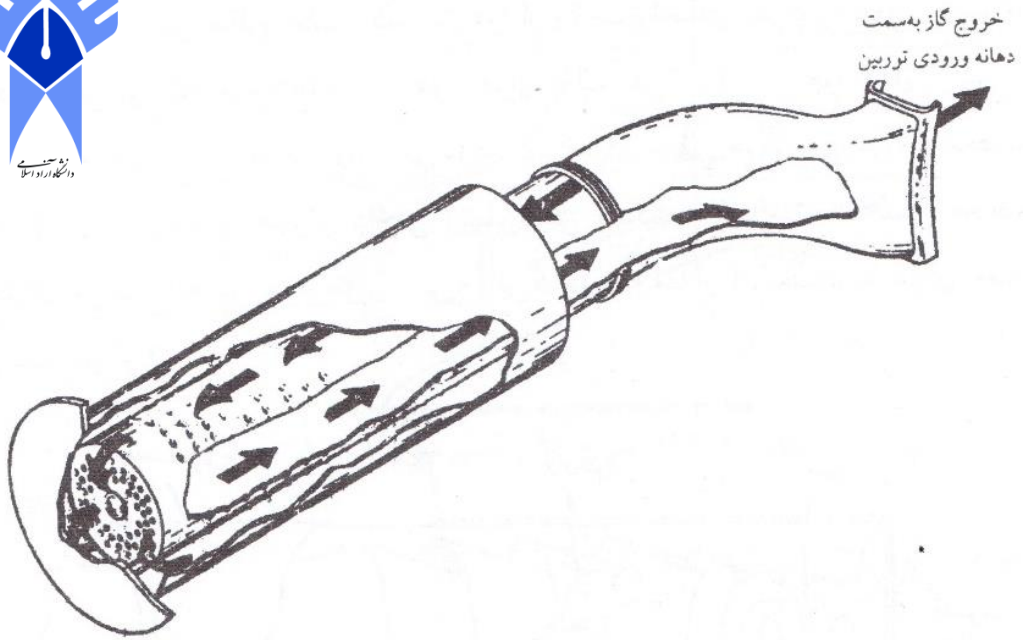



شکل (۴-۱۵): طرح کلی محفظه‌ی احتراق [۵]

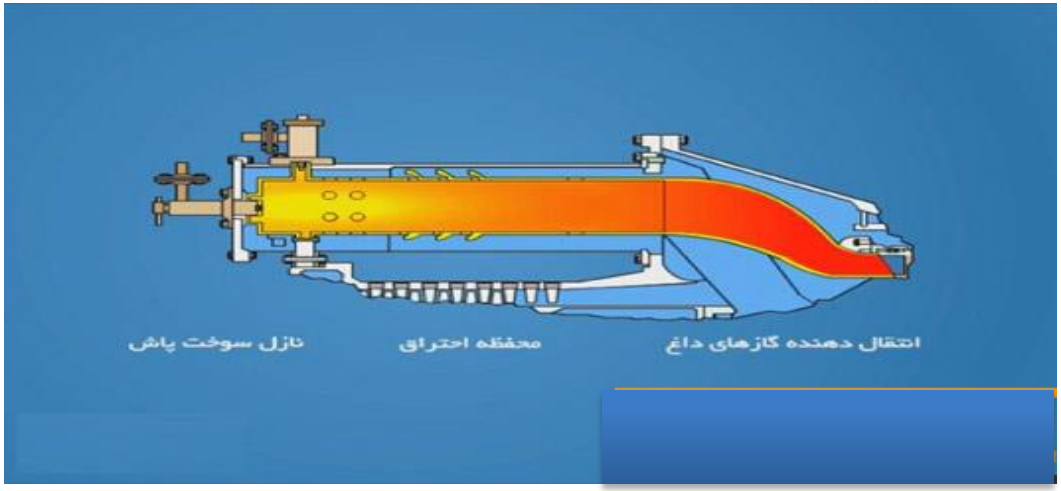
در محفظه احتراق مادامی که سوخت و هوا وجود دارد باید مشعل روشن بماند ، برای روشن کردن مشعل ابتدا از شمع جرقه زن استفاده می شود.

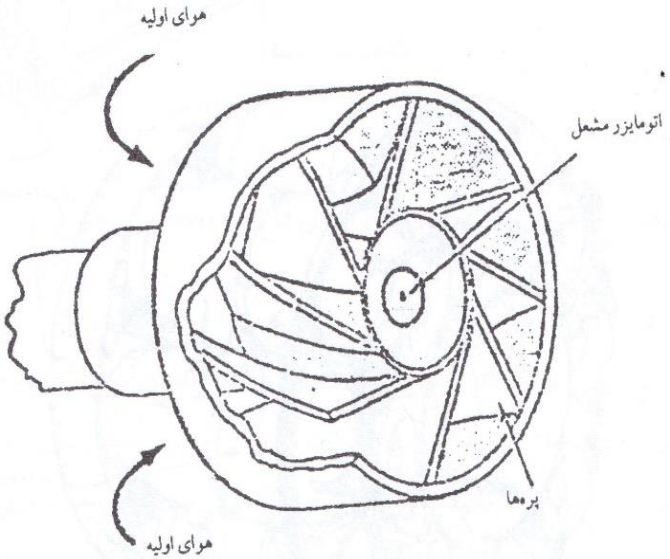
عموماً سوخت به کار رفته در محفظه احتراق گاز طبیعی یا مایع های سوختی مانند گازوئیل می باشد .

البته در بیشتر نیروگاه های گازی ، از گاز طبیعی استفاده می شود.

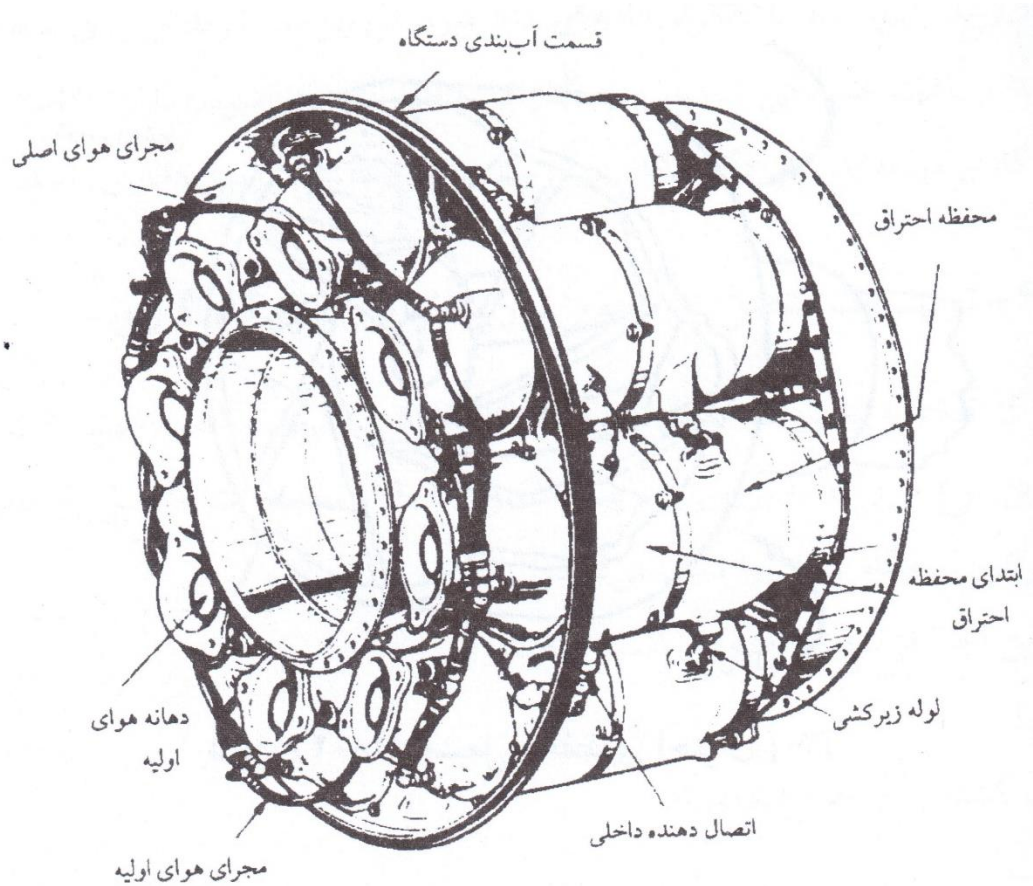



شکل (۴-۱۶): مسیر جریان‌های هوای داغ در محفظه‌ی احتراق [۱۹]

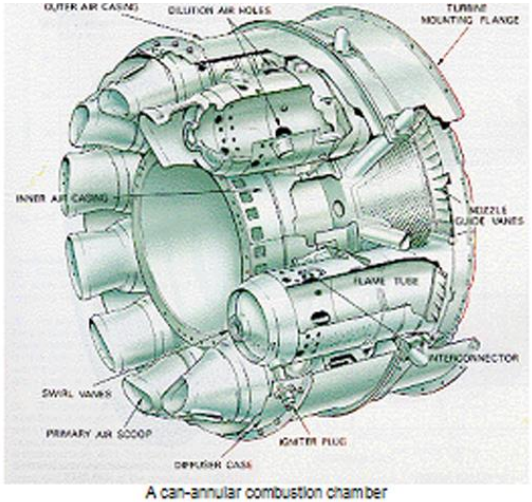


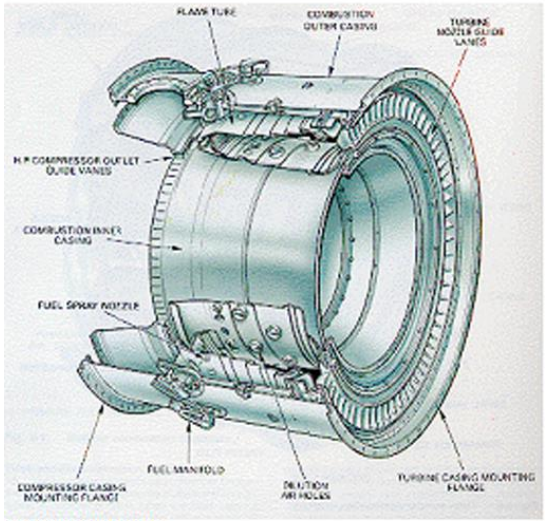

شکل (۴-۱۸): مشعل محفظه‌ی احتراق [۲۰]



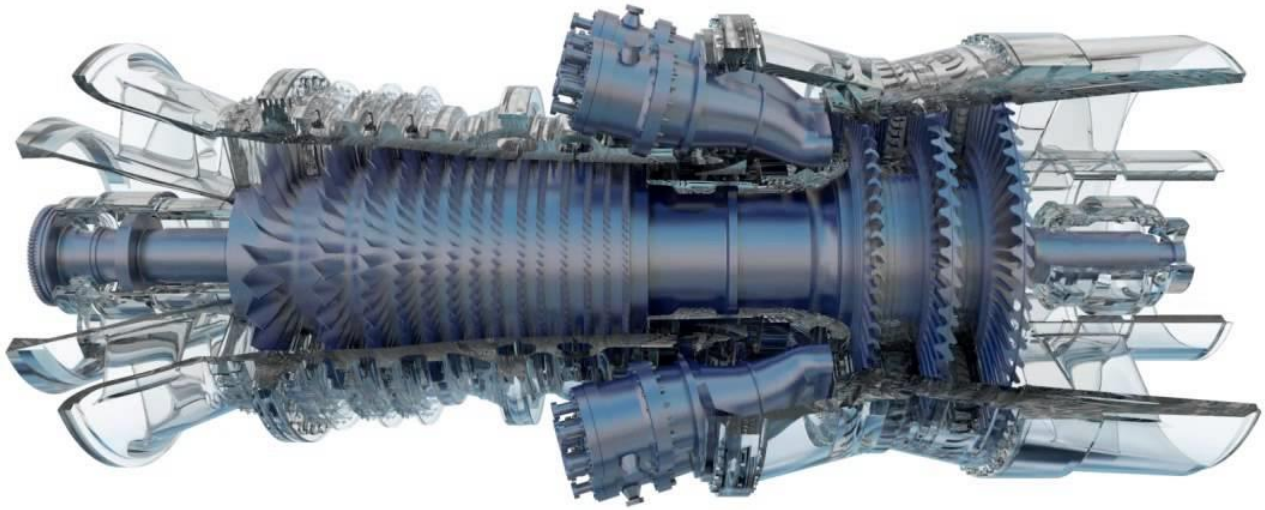

(۴-۱۷): محفظه‌های احتراق و سیستم سوخت‌رسانی یک نیروگاه گازی [۱۹]




A can-annular combustion chamber



## ۳-۳-۵- توربین گازی



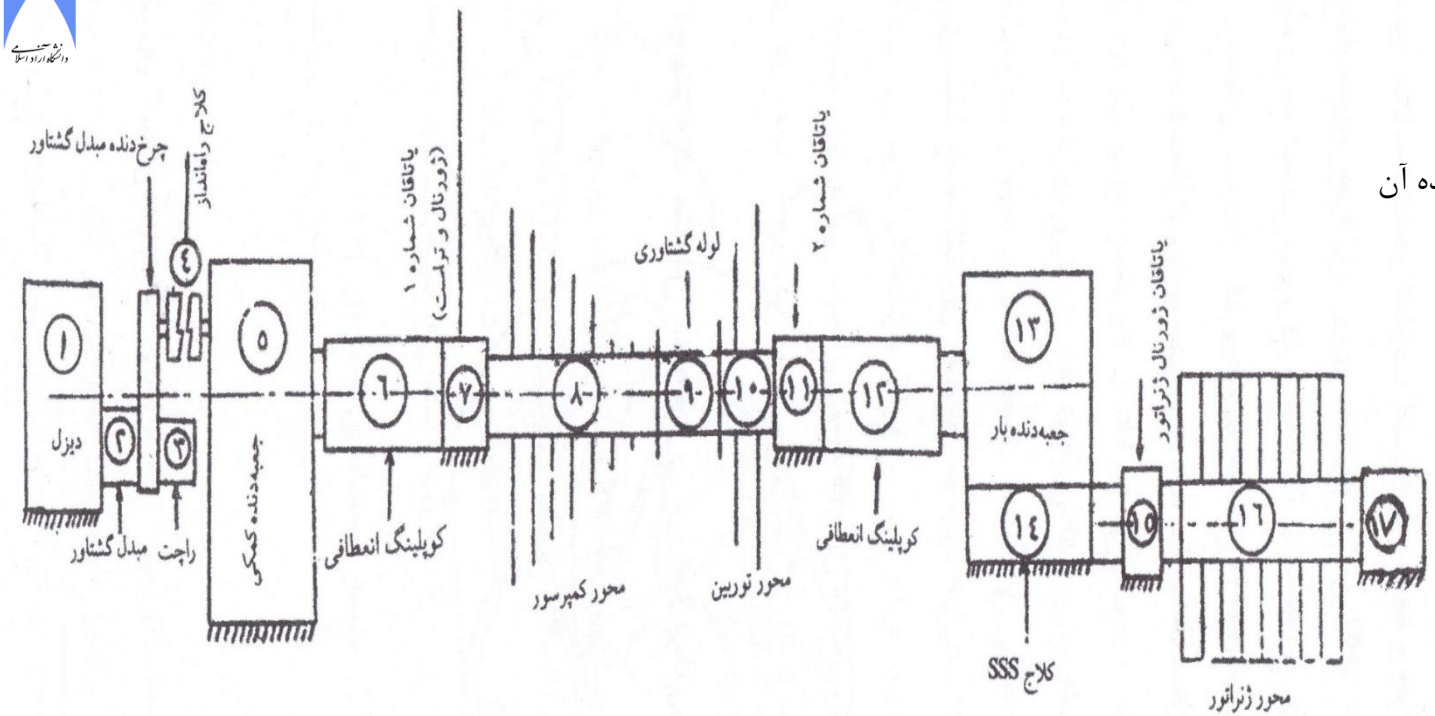
توربین نیروگاه گازی همانند توربین نیروگاه بخاری دارای دو نوع جریان محوری و جریان شعاعی است که بیش از ۸۰٪ محوری کاربرد دارد و از دو نوع پره متحرک ضربه ای و عکس العملی استفاده می‌کند.

دو تفاوت عمده بین آنها وجود دارد:

الف) دمای گازهای احتراق ورودی به توربین گازی بسیار بیشتر از توربین بخار می‌باشد. پس پره های توربین گازی باید تحمل دمای بسیار زیادی را داشته باشند.

ب) در گازهای احتراق، عناصر زائدی از قبیل گوگرد، فسفر، سدیم، وانادیم و ... وجود دارد. که باعث خوردگی پره‌های توربین می‌شود.این عناصر روی سطح پره‌ها می‌نشیند و باعث خوردگی شیمیایی و مکانیکی سطح پره ها می‌شود.لذا استقامت پره‌های توربین گازی باید بیشتر از پره های توربین بخاری باشد.

## ۳-۳-۶- تجهیزات متصل به محور توربوژنراتور نیروگاه گازی




شکل (۴-۱۹): طرح کلی یک محور توربوژنراتور نیروگاه گازی

۱-دیزل

۲- مبدل گشتاور و چرخ دنده آن

۳- رایت

۴- کلاچ راه انداز

۵- جعبه دنده کمکی

۶- کوپلینگ انعطافی

۷- محفظه یاتاقان شماره۱

۸-محور کمپرسور

۹- لوله گشتاوری

۱۰- محور توربین

۱۱- محفظه یاتاقان شماره۲

۱۲- کوپلینگ انعطافی

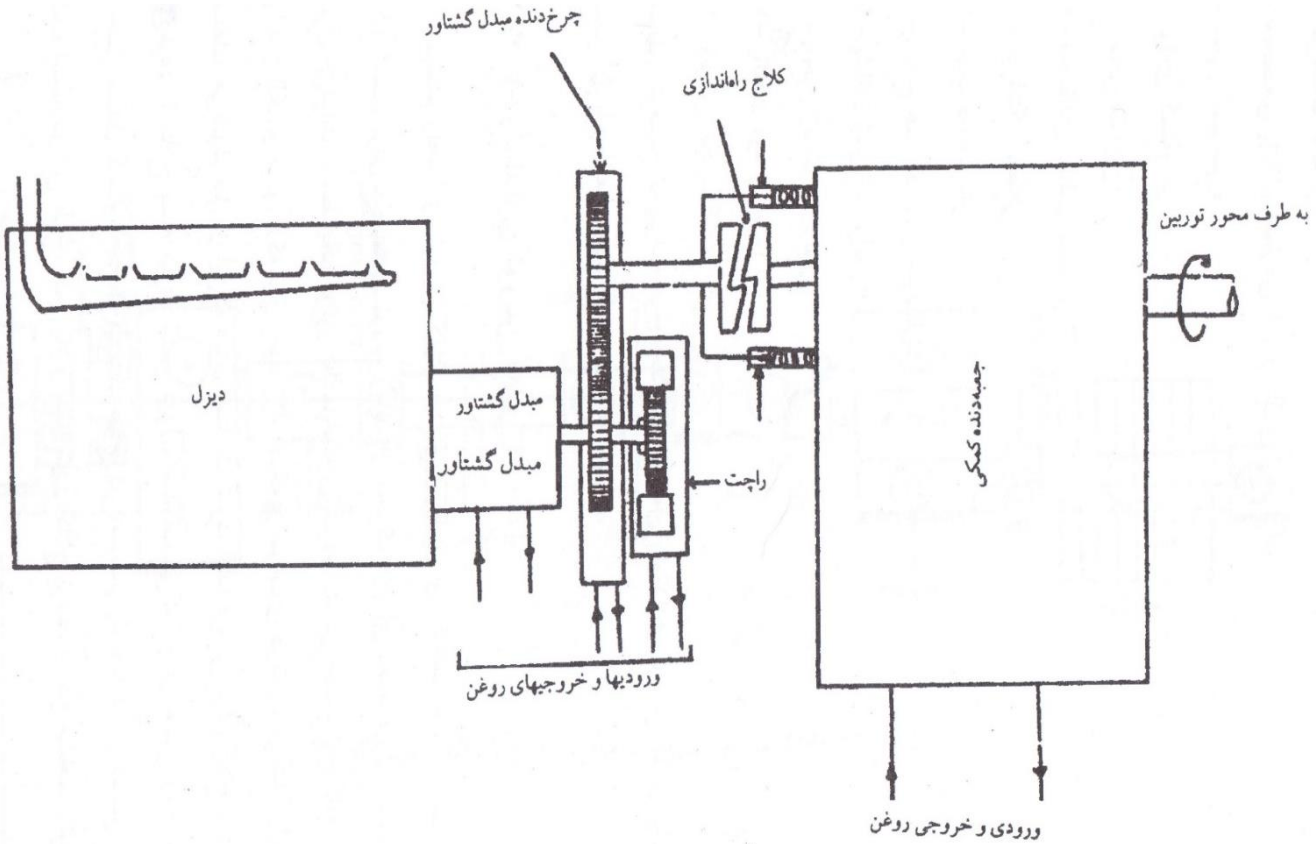
۱۳- جعبه دنده دار

۱۴- کلاچ عمل کننده خود کار

۱۵- یاتاقان ژورنال ژنراتور ۱۶- محور ژنراتور ۱۷- یاتاقان دوم ژنراتور ۱۸- ژنراتور تحریک.

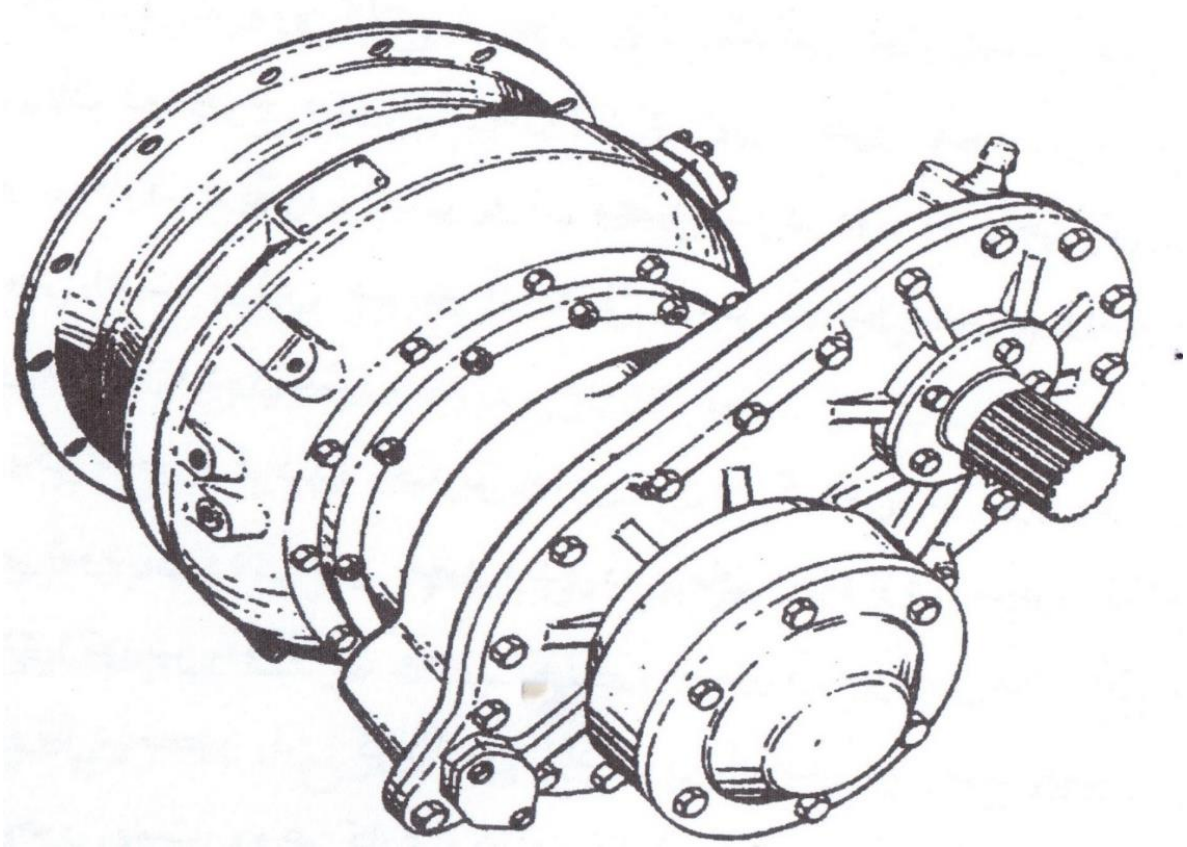
## ۳-۳-۷- راه اندازی توربین گازی

برای راه اندازی توربین باید از محرک اولیه به نام دیزل استفاده نمود. قبل از این که دیزل استارت شود ابتدا فرمانی برای کلاچ راه انداز فرستاده می‌شود تا کلاچ بسته شود سپس دیزل استارت می‌کند و روغن به داخل مبدل گشتاور جریان می‌یابد. در این طرح عمل باز و بسته شدن کلاچ روغن مشخص شده است. سیلندر روغن به کلاچ متصل است که با تزریق روغن به داخل این دو سیلندر کلاچ بسته می‌شود همواره در زمان راه‌اندازی دیزل است که موتور را به گردش در می‌آورد. پس از استارت دیزل جریان یافتن روغن در مبدل گشتاور، انتقال گشتاور از دیزل به بقیه قسمت توسط مبدل گشتاور امکان پذیر است. مبدل گشتاور اجازه می‌دهد تا دیزل بدون بار راه‌اندازی شود و به مرور که سرعت دیزل به سرعت نهایی می‌رسد به گشتاور منتقل می‌گردد.




شکل (۴-۲۰): طرح کلی اجزا راه‌اندازی توربین گازی

زمانی که دیگر توربین نیاز به گشتاور گرداننده نداشته باشد. کلاچ به طور خود کار باز می‌شود. با باز شدن کلاچ کار سیستم راه انداز به پایان رسیده و دیزل به مدت ۵ دقیقه در حالت بی باری کار کرده وسپس خاموش می‌شود.
وسیله دیگر در سیستم راه‌انداز راچت است، کاربرد راچت در زمان از کار افتادن توربین است وقتی توربین خاموش می‌شود به دلیل داغ بودن محور نباید توربین سریعاً متوقف شود احتمال خمش محور توربین وجود دارد.
محور توربین تا زمان سرد شدن توربین باید چرخانده شود.بین محور رایت ومحور گردانده شده یک هرز گرد وجود دارد تا راچت بتواند فقط محور توربو ژنراتور را بگرداندو عکس آن امکان پذیر نباشد.



بین مبدل گشتاور وراچت یک جعبه دنده مبدل گشتاور وجود دارد.
دور خروجی این جعبه دنده از دور ورودی آن کمتر است به همین دلیل گشتاور بیشتری لازم داریم تا دور بیشتر برای این که از یک محور گرداننده چندین محور را به گردش در بیاوریم از جعبه دنده کمکی استفاده می‌شود وخروجی آن محور پمپ، محور پمپ گازوئیل محور پمپ رونده گازی با یاتاقان‌هاست از دیگر وسایل نصب شده بر روی محور توربوژنراتور کلاچ عمل کننده خودکار است توسط این کلاچ امکان تبدیل ژنراتور به موتور و با العکس وجود دارد.

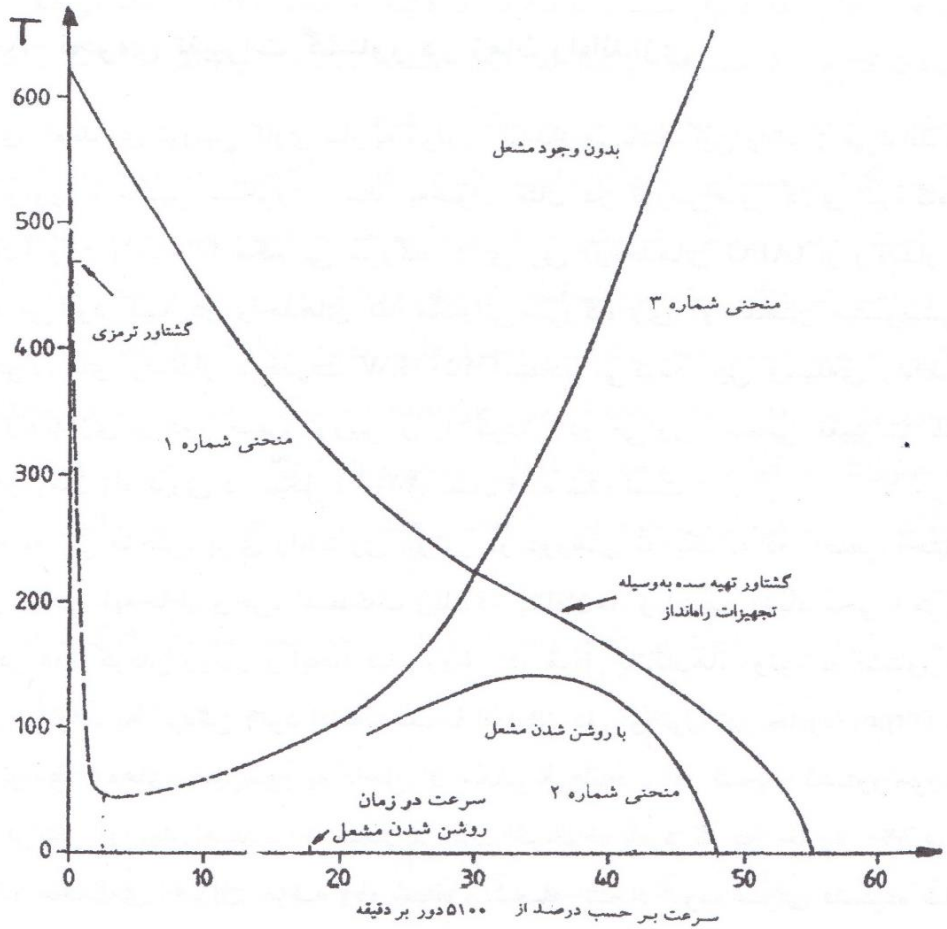
## ۳-۳-۸- نحوه ی تغییرات گشتاور در زمان راه اندازی

برای راه اندازی توربین گازی نیاز به موتور راه انداز می‌باشد این راه راه اندازی می‌تواند توسط دیزل باشد این وسیله راه اندازی در ابتدا راه اندازی از دور صفر توربین را به گردش در می آورد.

برای راه اندازی روتور در دورهای نزدیک به دور صفر احتیاج به گشتاور زیادی می‌باشد با افزایش دور روتور (RPM ۳) هوای محیط توسط پره های کمپرسور به داخل آن مکش می‌شود. قسمت ۱ منفی اگر فرض شود سرعت ۲۰ ٪ نامی می‌شود شعله روشن می‌شود و هوای فشرده شده به صورت گازهای داغ در می‌آید که قادر به ایجاد گشتاور محرک توربین می‌شود.

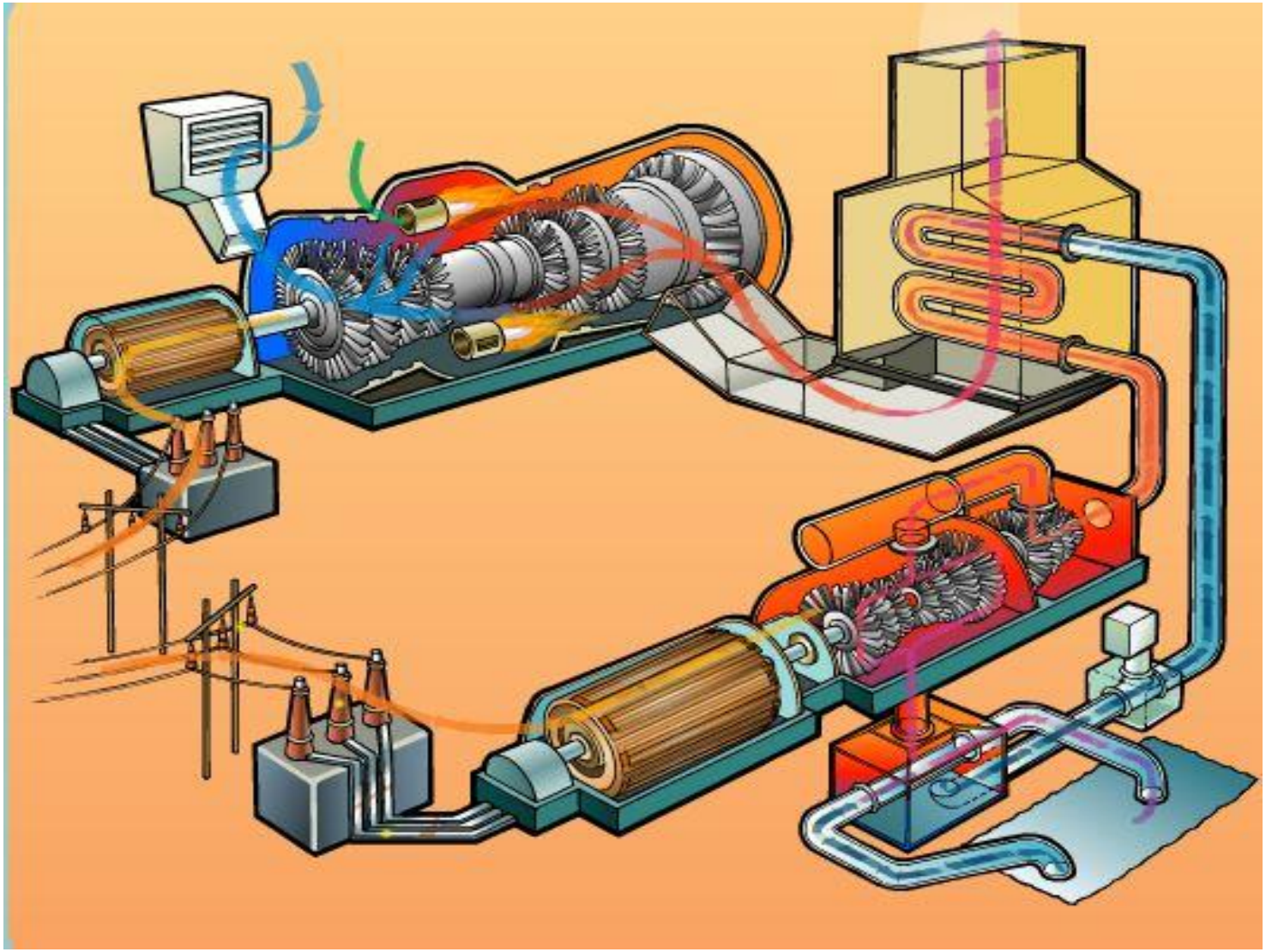
(منحنی شماره ۲) بعد از مدتی محور دیزل از محور توربو کمپرسور جدا می‌شود. درابتدای راه اندازی نیاز به گشتاور راه اندازی زیادی است ولی به تدریج با بالا رفتن دور گشتاور مورد نیاز کاهش می یابد.

(منحنی شماره ۳) تغییرات گشتاور برحسب دور را در خروجی مبدل گشتاور نشان می‌دهد.




شکل (۴-۲۲): گشتاور مورد نیاز در راه‌اندازی نیروگاه گازی

## ۳-۴- نیروگاه چرخه ترکیبی



## ۳-۴-۱- مقدمه

بازده این نوع نیروگاه ها نسبت به نیروگاه‌های بخاری بسیار کم می‌باشد در توربین گازی دمای هوا با فشار زیاد حدود ۱۱۰۰ تا ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد است. در قسمت نیروگاه گازی یکی از راه های استفاده از حرارت هوای خروجی از توربین و افزایش بازده استفاده از مبدل بازیاب می‌باشد در این مبدل با توجه به اختلافات دمای سیال خروجی از توربین و کمپرسور انتقال حرارت از سیال خروجی از توربین به هوای خروجی از کمپرسور صورت می‌گیرد به خاطر لوله های بزرگ و سطوح تبادل حرارتی هزینه‌ی ثابت این نوع نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد بنابراین بالا بردن بازده از این طریق روش پر هزینه ای است یکی از راه‌های مناسب استفاده از گازهای خروجی از توربین های گازی و توربین بخار است نیرو گاه چرخه ترکیبی می‌گویند در جدول (۴-۲) مشخصات نیروگاه‌های چرخه ترکیبی کشورمان در سال ۱۳۸۵ ارائه شده است.

جدول (۴-۲): مشخصات نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی ایران (در سال ۱۳۸۵)

| نیروگاه | محل جغرافیایی | زمان بهره‌برداری | تولید واحد گازی MW | تولید واحد بخاری MW | مجموع تولید MW |
|---|---|---|---|---|---|
| دماوند | دماوند | ۱۳۸۲–۸۴ | ۱۲×۱۰۸ | ——— | ۱۹۰۸ |
| گیلان | رشت | ۱۳۷۱<br>۱۳۷۶ | ۶×۱۴۳٫۲<br>——— | ———<br>۳×۱۴۸٫۸ | ۱۳۰۵٫۶ |
| کرمان | کرمان | ۱۳۸۰–۸۱ | ۸×۱۵۹٫۰ | ——— | ۱۲۷۲٫۰ |
| شهید رجایی | قزوین | ۱۳۷۳<br>۱۳۸۰ | ۶×۱۲۳٫۸<br>——— | ———<br>۳×۱۰۰ | ۱۰۴۲٫۸ |
| فارس | شیراز | ۱۳۷۴–۷۷<br>۱۳۸۱ | ۶×۱۲۳٫۴<br>——— | ———<br>۳×۱۰۰ | ۱۰۴۰٫۴ |
| نیشابور | نیشابور | ۱۳۷۳–۷۷<br>۱۳۸۱–۸۲ | ۶×۱۲۳٫۴<br>——— | ———<br>۳×۱۰۰ | ۱۰۴۰٫۴ |
| منتظر قائم | کرج | ۱۳۷۱<br>۱۳۷۸ | ۶×۱۱۶٫۲۵<br>——— | ———<br>۱×۱۰۰ | ۹۹۷٫۵ |

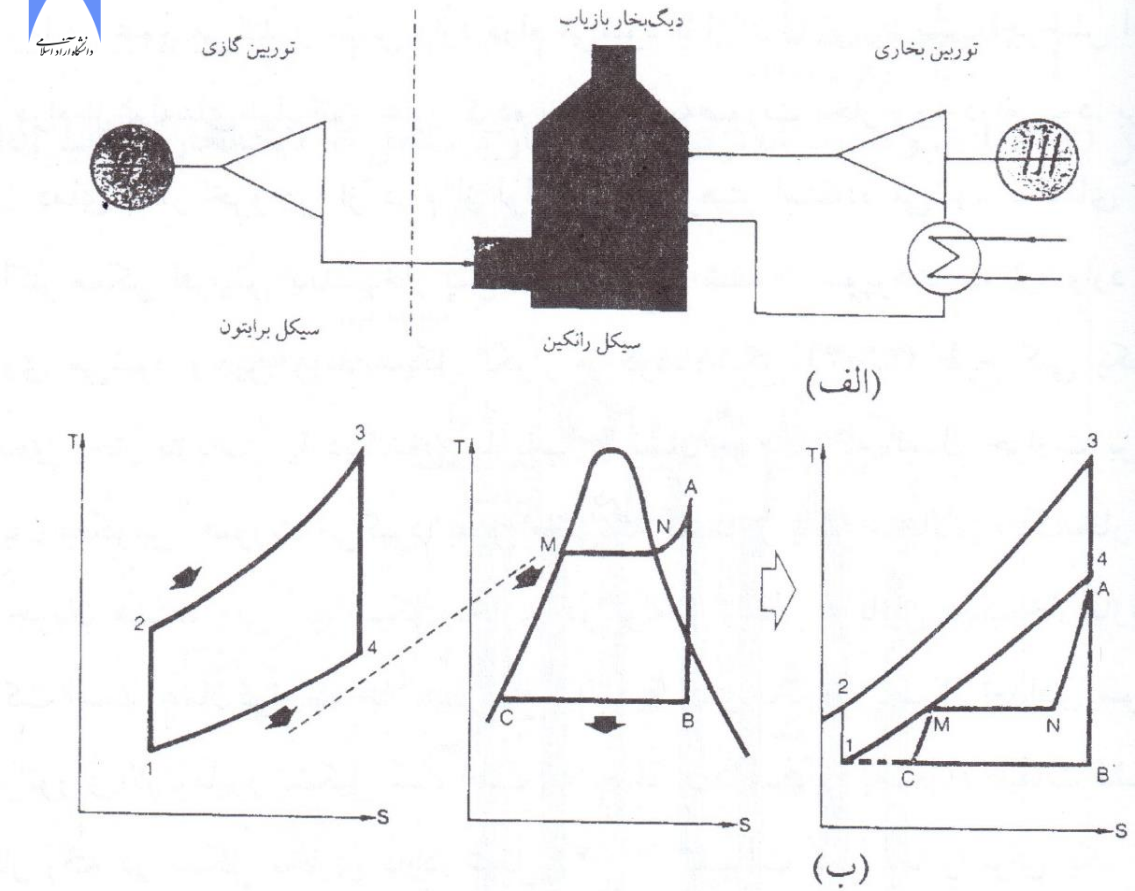
این سیکل‌ها علاوه بر داشتن بازده و توان بالا دارای بارهای پایه و عملکرد دورهای می‌باشد.

البته دارای مشکلاتی هستند :

۱- وابستگی واحدهای بخاری به واحدهای گازی.

۲- تفاوت طول عمر هر دو نوع واحد.

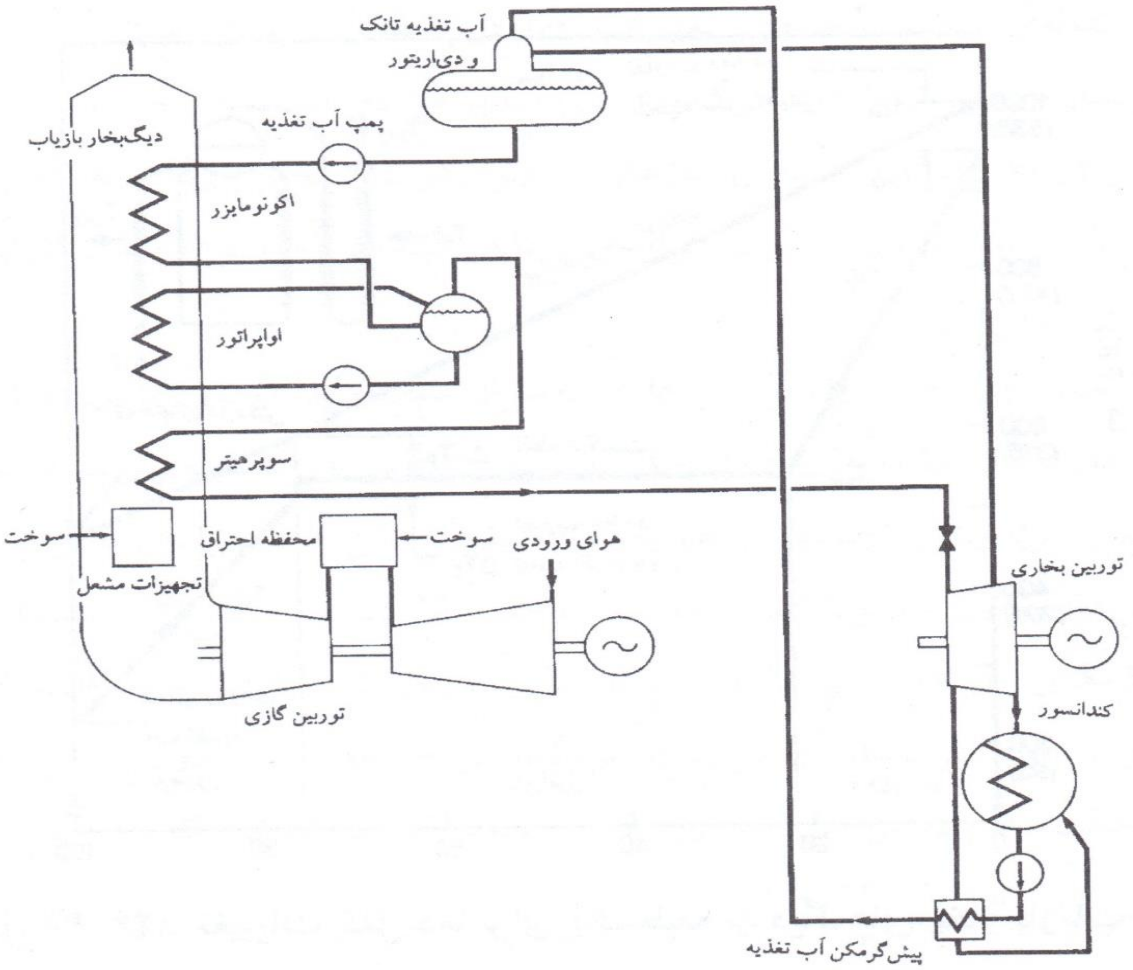
طرح کلی نیروگاه چرخه ترکیبی در شکل (۴-۲۳-الف) همچنین نمودار T-S نیروگاه بخاری – گازی و چرخه ترکیبی در شکل (۴-۲۳- ب) به دیگ بخار بازیاب و توربین بخار سیستم اصلی انرژی (FRS ) می‌گوییم.



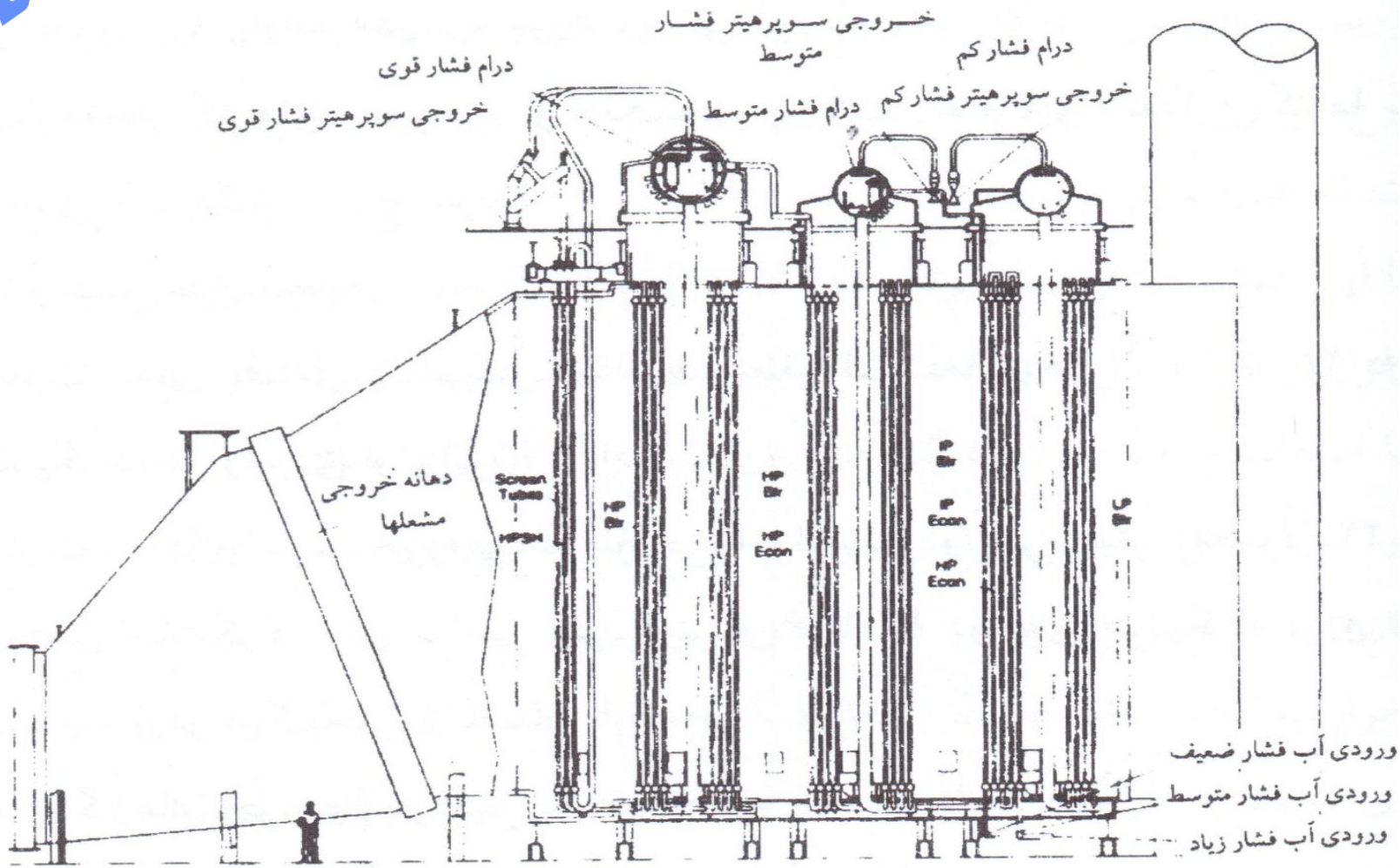

(۴-۲۳): سیکل ترمودینامیکی نیروگاه چرخه‌ترکیبی، الف) طرح کلی سیکل؛ ب) منحنی T-S سیکل گازی، بخاری و چرخه‌ترکیبی [۱۷]

## ۳-۴-۲- نیروگاه چرخه ترکیبی با دیگ بخار بازیاب

شکل (۴-۲۴ ) شمای کلی و ساده یک نیرو گاه چرخه ترکیبی را نشان می‌دهد. گازهای داغ خروجی از توربین نیروگاه گازی وارد دیگ بخار بازیاب می‌شود. در سیکل بخاری، بخار پس تافته تولید شده در دیگ بخار بازیاب پس از عبور از توربین و منبسط شدن وارد کندانسور می شود، آب خروجی از کتدانسور پس از گرم شدن در بخش گرمکن وارد مخزن دی اریتور می‌شود. سپس پمپ آب فشار سیال را افزایش می‌دهد برای استفاده حداکثر ازحرارت موجود در دیگ بخار آب را از لوله‌های اکونومایزر عبور می‌دهند وسپس وارد درام می کنند برای بالا بردن دمای بخارخروجی از درام از لوله های سوپر هیتر استفاده می‌شود تا دمای بخار آب تا حداکثر ممکن افزایش یابد بخار آب خارج شده از سوپر هیتر دوباره وارد توربین بخار می‌شود شکل (۴-۲۵) طرح کلی یک تولید کننده بخار بازیاب را نشان می‌دهد.




(۴-۲۴): نیروگاه چرخه‌ترکیبی تک فشار با مشعل در دیگ‌بخار بازیاب [۵]




شکل (۴-۲۵): طرح کلی یک تولید کننده‌ی بخار بازیاب (دیگ‌بخار بازیاب) [۱۸]

در طراحی بهینه یک طبقه از دیگ بخار بازیاب و به منظور استفاده حداکثر از حرارت موجود در گازهای خروجی از توربین گازی باید پارامترهای زیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

۱- فشار مجاز گازهای خروجی از دیگ بخار بازیاب به گونه ای که این گازها بتوانند به راحتی از دود کش خارج شوند.

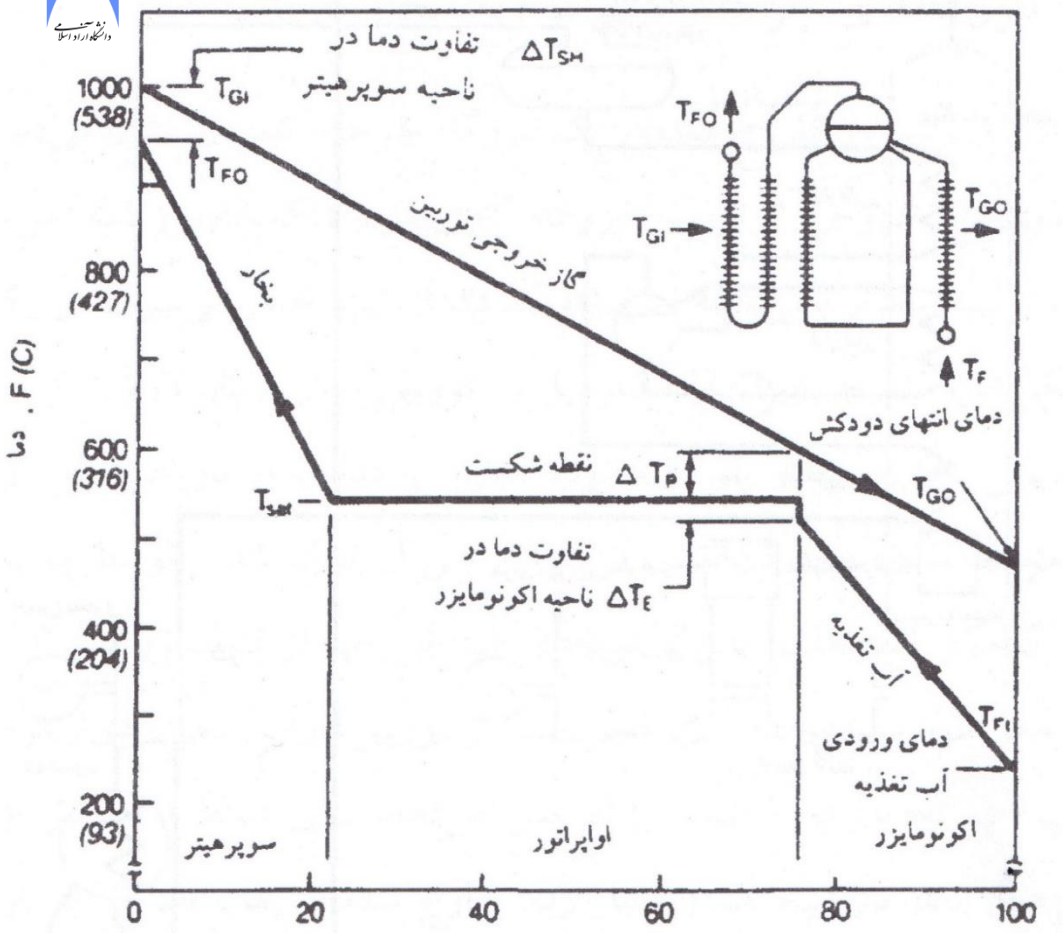
۲- دما و فشار سیال بخار

۳- تفاوت دمای نقطه شکست در منفی تغییرات دما در ورودی اوپراتور

۴- تفاوت دماهای مسیر خروجی در نواحی اکونومایزر و سوپر هیتر

۵- دمای گازهای خروجی دودکش.

و نقطه شکست منحنی تغییرات دما در نقطه ورودی سیال به اپراتور از اهمیت بسیار زیادی در بازده دیگ بخار بازیاب برخوردار است هر چه تفاوت بین دمای اپراتور و دمای گازهای موجود در دیگ بخار بازیاب به کمترین مقدار خود برسد بازده انتقال حرارت افزایش می یابد.




(۴-۲۶): تغییرات کلی دما برای یک طبقه از دیگ‌های بخار بازیاب

در نیرو گاه های چرخه ترکیبی توربین گازی به عنوان منبع تولید هوا و احتراق عمل می نماید. به عبارت دیگر توربین گازی هم به منزله فن اجباری وهم به عنوان پیش گرمی هوا می باشد.

در توربین گازی نسبت هوا به سوخت تقریباً ۴۰۰٪ است.

در چرخه ترکیبی با قدرت توربین بخاری که هم نیازی به سوخت اضافی در دیگ بخار بازیاب نمی‌شود به این نوع نیروگاه های چرخه ترکیبی بدون مشعل می گویند.

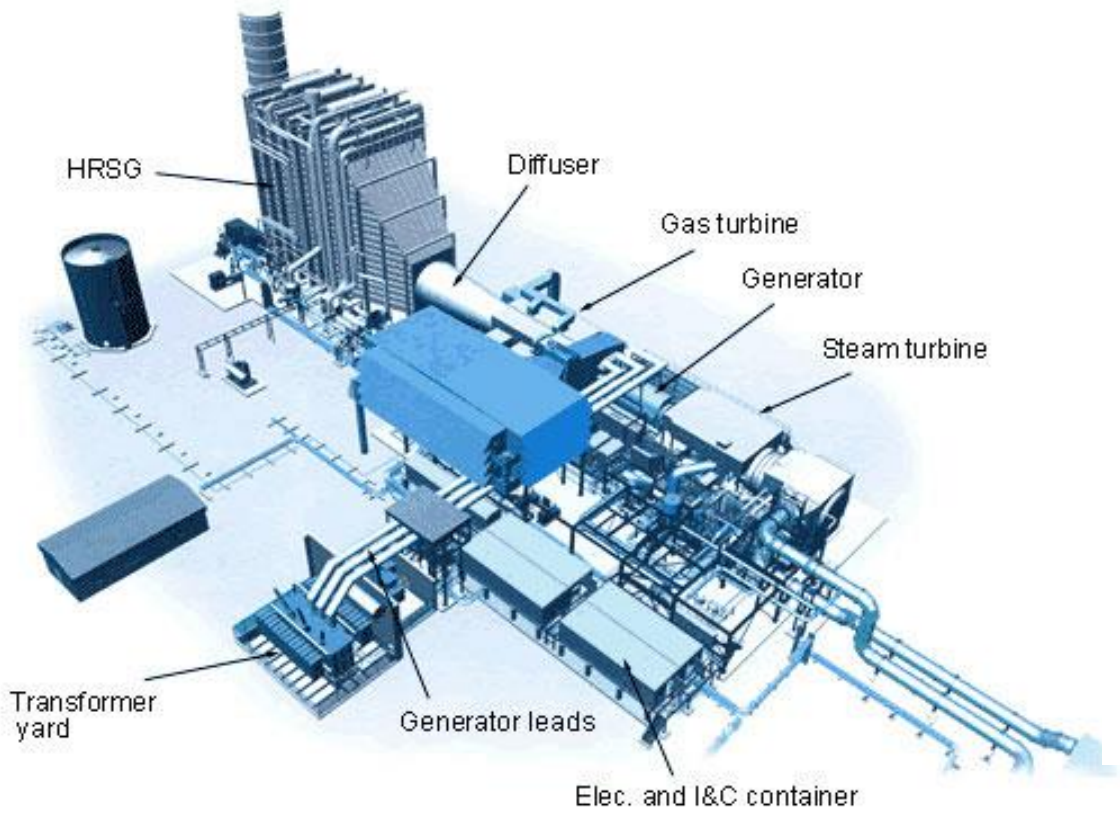
در نیروگاه های با قدرت زیاد با تعبیه مشعل های همراه با سوخت اضافه با میتوان بخار پس تافته ورودی به توربین را افزایش داد در مجموع می توان گفت که تعبیه مشعل در در دیگ بخار مسائلی را به همراه خود داردعبارتند از:

۱-بخار تولید شده در دیگ بخار افزایش می‌یابد تقریباً میزبان آن دو برابر حالتی است که مشعل اضافه ندارد.

۲- مقدار فشار و دمای سوپر هیت نمودن بخار موجود افزایش می یابد استفاده بیشتری از حرارت موجود در گازهای خروجی از توربین گازی صورت میگیرد.

۳- حرارت ایجاد شده توسط مشعل دارای بازده کمتری نسبت به حرارت ایجاد شده در سوخت اصلی توربین گازی است.

این نکات در مجموع قدرت تولیدی این نوع نیروگاه ها افزایش می یابد به این نوع نیروگاه ها چرخه ترکیبی با مشعل می گویند. که سهم قدرت توربین گازی و بخاری باهم برابر است در این حالت دمای گازهای حاصل از احتراق در دیگ بخار بازیاب به ۷۶۰ درجه سانتی گراد هم می‌رسد.



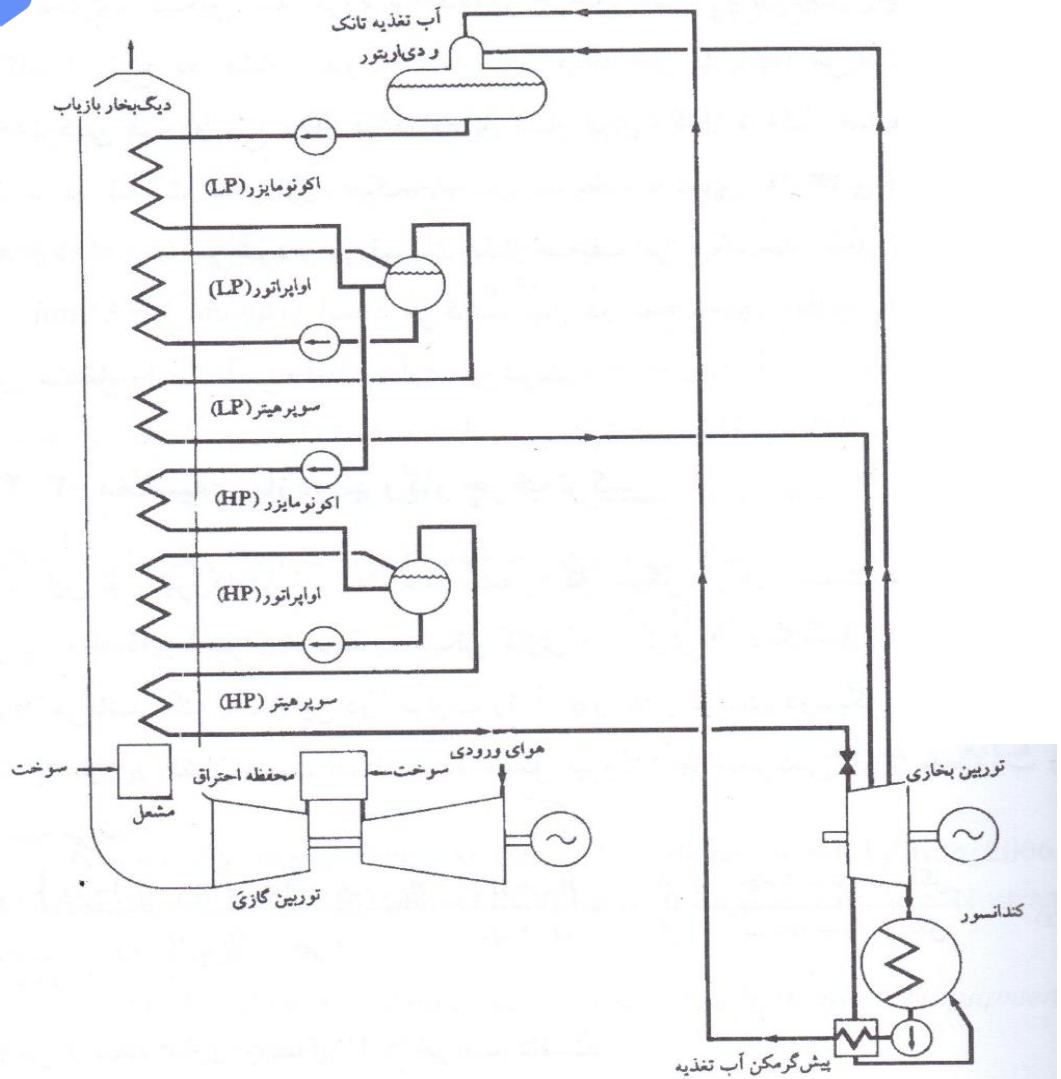
در نیروگاه های چرخه ترکیبی باقدرت بالا به منظور استفاده بیشتر از دمای گازهای موجود در دیگ بخار ، پس تافته با فشارهای متعدد تولید می شود.

دیگ بخار بازیاب در شکل (۴- ۲۴) از نوع تک فشار می باشد ساده ترین نوع این سیکلها نیروگاه چرخه ترکیبی دو فشاره همراه با مشعل در دیگ بخار بازیاب می باشد.

در دیگ بخار دو فشاره دو نوع بخار پس تافته با فشار زیاد و فشار کم ایجاد می شود .

بخار با فشار زیاد از مجرای ورودی توربین وارد آن می شود ولی بخار با فشار کم از طبقات با فشار پایین تر وارد توربین میشود.

در نیرو گاه های چرخه ترکیبی دو فشاره با قدرت بالا به منظور ایجاد حرارت بیشتر از چند واحد گازی استفاده شود.




شکل (۴-۲۷): نیروگاه چرخه‌ترکیبی دو فشاره با مشعل در دیگ‌بخار بازیاب [۴]

## ۳-۴-۳- محاسبه بازده نیروگاه چرخه ترکیبی

در این نوع نیرو گاه ها حرارت داده شده به سیکل در دو قسمت صورت میگیرد:

یکی در محفظه احتراق مربوط به سیکل گازی و دیگری در دیگ بخار بازیافت در سیکل بخاری می باشد.

$$\eta_{CO} = \frac{\text{کل کار انجام شده توسط سیکل}}{\text{کل حرارت داده شده به سیکل}} = \frac{W_1 + W_2}{q_1 + q_2} = \frac{\eta_{C1} \cdot q_1 + [(q_1 - \eta_{C1} \cdot q_1) + q_2] \cdot \eta_{C2}}{q_1 + q_2}$$

q2 , q1 = مقدار حرارت

Nc2 , Nc1= بازده در سیکل گازی و بخاری

که پس از ساده سازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\eta_{CO} = \frac{\eta_{C2} \cdot (q_1 + q_1) + \eta_{C1} \cdot q_1 \cdot (1 - \eta_{C2})}{q_1 + q_1} = \eta_{C2} + \frac{q_1 \cdot \eta_{C1} \cdot (1 - \eta_{C2})}{\cdot q_1 + q_2}$$

که در رو ابط بالا q1 - Nc1.q1 مقدار حرارت گازهای خارج شده از توربین گازی و x2 حرارت ایجاد شده توسط مشعل دیگ بخار بازیاب است بازده سیکل نیروگاه چرخه ترکیبی از سیکلهای گازی و بخاری بیشتراست.

## ۳-۵- سوالات مروری

۱- راه های افزایش بازده سیکل براتیون یک نیرو گاه گازی را توضیح دهید.

در هر حالت منحنی T-S سیکل ترمو دینامیکی را رسم نمایید.

۲-در راه اندازی یک نیرو گاه گازی چه شرایطی راباید در نظر گرفت مراحل راه اندازی سیکل گازی به چه صورت است؟

۳ - دلایل استفاده از نیرو گاه های چرخه ترکیبی به جای نیروگاه های گازی چیست؟

۴- در شکل (۴-۲۷) نیرو گاه چرخه ترکیبی دو فشاره با مشعل در دیگ بخار بازیاب نشان داده شده است نحوه عملکرد این سیکل را به طور کلی بیان نمایید.

۵- چرا بازده سیکل ترمودینامیکی نیروگاه چرخه ترکیبی از بازده سیکلهای نیرو گاه های گازی و بخاری بیشتر می‌باشد؟