A-PDF Watermark DEMO: Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

۱۳۹۱

تشریح و اصول کار توربین های گازی مورد استفاده در صنعت نفت و نیروگاه

مهندس حامد مطلق

اهمیت بیش از اندازه توربین های گازی و کاربرد بسیار زیاد آن بعنوان یک نیروی محرکه ،بنده را بر آن داشت تا به لطف و یاری خدا بتوانم این پروژه را بنویسم و به پایان برسانم

مهندس حامد مطلق

1391

http://www.mohandes-iran.com

هوالعلیم

امام کاظم (ع) :

زکات علم ترویج علم است.

موضوع:

تشریح و اصول کار توربین های گازی مورد استفاده در صنعت نفت و نیروگاه

Gas turbines description and principles of work used in the oil industry and power plant

خواننده محترم لطفا نظرات خود را به ایمیل من بفرستید تا در رفع نواقص خود کوشا باشم و اگر احساس رضایت دارید نظر خود را بگویید تا خدا را شاکر باشم

E-MAIL:

Hamed_gas2012@ymail.com

http://www.mohandes-iran.com

http://www.mohandes-iran.com

تقدیم:

تقدیم به آنانکه عاشقانه و دلسوزانه راه را برای ما هموار ساختند تا ما بتوانیم به هدفمان برسیم تقدیم به آنانکه سوختند تا با روشنایی سوختن خود راه را برایمان روشن کنند و گرمابخش وجود ما باشند . تقدیم به تمام شهدای راه حقیقت که رفتند تا ما بمانیم و تقدیم به استادی که عاشقانه در کلاس به من علم آموخت. این پایان نامه را به چند نفر تقدیم میکنم

- تقدیم به **پدر و مادر** عزیزم که موهایشان سپید شد تا من رو سفید شوم و وجودشان گرما بخش وجودم شد
- تقدیم به پدربزرگ و مادربزرگ عزیزم که بستری را برای مطالعه درسی من آماده کردند
- تقدیم به روح بزرگ پدر بزرگم آیت الله حاج شیخ فضل الله مطلق که آرزوی دیدن موفقیت من را داشت ولی عمرش به دنیا نبود

http://www.mohandes-iran.com

تقدیر و تشکر :

به نام خالق هستی

به نام آنکس که برای همه جهان معلم است، به نام خدایی که دانه را غذای پرنده قرار داد ولی هیچگاه دانه را در دهانه پرنده قرار نداد. خدا را سپاس که توفیق علم آموزی به من عطا کرد و علم و دانش را راه بزرگی انسان و فرار از جهل و نادانی قرار داد و رسولانش را برای هدایت ما انسان ها آفرید. و در حقیقت باید دانست که علم و دانش همان قدرت است .از خداوند منان خواستارم که توفیق خدمت به کشور عزیزم ایران را به من عطا کند و در لحظه لحظه زندگیم فکر سربلندی وطنم باشم و یاد خدا را در دلم روشن نگه دارم.

امام علی(ع) می فرماید : لا یدرک العلم به راحته الجسم .(علم با راحتی جسم درک نمیشود)و فرمودند هرکس به من کلمه ای را بیا موزد مرا بنده خود کرده است و طبق گفته امیرالمومنین در اینجا لازم است که مراتب تقدیر و تشکر خود را خالصانه از استادانی که به جز آموختن علم راه را برای ادامه زندگی من روشن کردند و نصیحت های آنها راه گشای من بود ابراز دارم، جناب آقای دکتر گل حسینی ، دکتر چنگلوایی ، دکتر علیرضا عظیمی، دکتر احمد آذری که براشان آرزوی سلامتی و توفیق خدمت به کشورمان را برایشان آرزومندم.

حامد مطلق

پاییز ۱۳۹۱

http://www.mohandes-iran.com

چکیده:

توربین های گازی تجهیزاتی هستند که خود محرکه هستند به عبارتی دیگر خودشان تولید انرژی می کنند به همین منظور کاربرد فراوانی برای تولید انرژی در صنایع مختلف دارند از جمله در صنعت نفت برای به گردش در آوردن تجهیزات دوار و در صنعت نیروگاهی برای تولید توان دارند.

از زمان تولد توربینهای گازی امروزی در مقایسه با سایر تجهیزات تولید قدرت،زمان زیادی نمی گذرد با این وجود امروزه این تجهیزات به عنوان سامانه های مهمی در امر تولید قدرت مکانیکی مطرح می باشند. از تولید انرژی مکانیکی وانرژی برق گرفته تا پرواز هواپیماهای مافوق صوت همگی مرهون استفاده از این وسیله سودمند می باشند . ظهور توربینهای گازی باعث پیشرفت زیادی در رشته های مهندسی مکانیک , متالورژی ، مهندسی شیمی،صنعت نفت و سایرعلوم مربوطه گشته است.

اصطلاح "Gas Turbine" به عنوان یک واژه ی عمومی برای انواع موتورهای توربینی مورد استفاده قرار میگیرد توربین گازی دارای سه بخش اصلی است که عبارتند از : کمپرسور ، محفظه احتراق و توربین قدرت است که ما به تشریح این سه قسمت مفصل پرداخته ام در این پایان نامه در رابطه با این وسیله و کاربرد و تشریح آن سخن گفتیم که نشان میدهد که این دستگاه چه کاربردهای عظیمی دارد.

http://www.mohandes-iran.com

فهرست مطالب

مقدمه ۱

۱- فصل اول : آشنایی با توربین گازی

۱-۱- تاریخچه توربین گازی ۶

۱-۲- دسته بندی زمانی تاریخچه توربین گازی و موتور جت..... ۸

۱-۳- انواع توربین ۱۰

۱-۴- انواع توربین های گازی..... ۱۲

۱-۵- سیالات مورد استفاده در توربین ۱۵

۱-۶- اجزای توربین گازی ۱۵

۱-۷- اصول عملکرد در توربین گازی ۱۶

۲- فصل دوم : اجزای توربین گازی

۲-۱- کمپرسور ۲۳

۲-۲- اجزای شیپوره ۲۷

۲-۳- کمپرسورهای دوار با جریان محوری ۲۷

۲-۴- ویژگی های کمپرسور ۳۲

۲-۵- سرج در کمپرسور ۳۲

۲-۶- تبدیل انرژی در کمپرسور هوا ۳۵

۲-۷- محفظه احتراق ۳۶

۲-۸- نکات مهم طراحی سیستم احتراق در توربین گازی ۳۸

۲-۹- محاسبه گرمای سوختن ۳۹

http://www.mohandes-iran.com

mohandes-iran.com

۲-۱۰- سوختن در محفظه احتراق ۴۱
۲-۱۱- انرژی فعالسازی ۴۱
۲-۱۲- استوکیومتری سوختن ۴۲
۲-۱۳- دمای آدیاباتیک شعله ۴۴
۲-۱۴- سیستم احتراقی توربین گازی ۴۵
۲-۱۵- افشاننده ۴۶
۲-۱۶- نازل سوخت و ناحیه اصلی ۴۷
۲-۱۷- ناحیه میانی ۵۰
۲-۱۸- ناحیه رقیق سازی ۵۰
۲-۱۹- پایداری سوختن و آهنگ آزادسازی گرما ۵۱
۲-۲۰- انواع متداول محفظه احتراق در صنعت ۵۷
۲-۲۱- تأثیرات زیست محیطی دودهای حاصل از احتراق ۶۰
۲-۲۲- توربین قدرت ۶۴
۲-۲۳- توربین ضربه ای ۶۸
۲-۲۴- توربین عکس العملی ۷۰
۲-۲۵- ساختمان توربین ۷۵

۳- فصل سوم : عملکرد ترمودینامیکی توربین گازی

۳-۱- چینش اجزای توربین گازی ۸۱
۳-۲- توربین گازی تک محوری ۸۲
۳-۳- توربین گازی دو محوری به همراه توربین قدرت ۸۳
۳-۴- توربین گازی سه محوری به همراه توربین قدرت ۸۴

http://www.mohandes-iran.com

۳-۵- توربین گازی دو محوری ۸۵
۳-۶- توربین های گازی با چرخه بسته ۸۶
۳-۷- انواع سیستم ها ۸۷
۳-۸- محیط ۸۸
۲-۹- تعاریف انرژی ۸۸
۲-۱۰- انرژی درونی ۸۹
۲-۱۱- قانون اول ترمودینامیک ۸۹
۲-۱۲- انواع فرآیند ۸۹
۲-۱۳- سیکل ها ۹۰
۲-۱۴- ماشین گرمایی ۹۲
۲-۱۵- قانون دوم ترمودینامیک ۹۵
۲-۱۶- سیکل رانکین ۹۶
۲-۱۷- سیکل برایتون ۹۹
۲-۱۸- قانون اول ترمودینامیک برای سیکل توربین گازی ۱۰۵
۲-۱۹- راندمان ترمودینامیکی توربین گازی ۱۰۶
۲-۲۰- سیکل عملی (واقعی) برایتون ۱۱۵

۴- فصل چهارم : روش های افزایش قدرت و راندمان

۴-۱- راه های اصلاح بازده و کار خروجی ویژه سیکل ساده ۱۲۱
۴-۲- سیکل به توربین گاز با خنک کن میانی ،گرمکن مجدد و بازیاب حرارتی..... ۱۳۴
۴-۳- شرایط استاندارد کاری توربین گازی ۱۴۴
۴-۴- تأثیر متغیرهای کار روی بازده ۱۴۴

http://www.mohandes-iran.com

۵-۴- کار در توربین و کمپرسور ۱۴۵
۶-۴- تزریق بخار به محفظه احتراق ۱۴۶
۷-۴- اثرات فیلتر هوا روی قدرت تولیدی توربین گاز ۱۴۹

۵- فصل پنجم : کاربرد توربین گازی

۱-۵- کاربرد در صنایع هوایی ۱۵۸
۲-۵- موارد کاربرد توربین گازی در سایر صنایع ۱۶۲
۳-۵- انتقال و پمپ کردن نفت و گاز ۱۶۳
۴-۵- پشتیبانی فشار مخازن ۱۶۴
۵-۵- تصفیه پالایش ۱۶۴
۶-۵- کاربرد توربین بخار در پالایشگاه ۱۶۶
۷-۵- مجموعه توربوکمپرسورهای پروپان ۱۶۷
۸-۵- توربین گازی در صنایع حمل و نقل ۱۶۸
۹-۵- توربین گازی در تولید انرژی الکتریکی ۱۶۹
۱۰-۵- توربین گازی در سیکل های ترکیبی ۱۷۰
۱۱-۵- کاربرد احتمالی توربین گازی در آینده ۱۷۲
۱۲-۵- پیشرفت های فنی ۱۷۴
۱۳-۵- مزایا و معایب توربین های گازی ۱۷۵

ضمیمه ۱۸۰
منابع ۱۹۲

http://www.mohandes-iran.com

مقدمه:

توربین دستگاهی است که در آن انرژی جنبشی سیال متحرک بعد از برخورد سیال با پره به انرژی مکانیکی تبدیل می شود که از این انرژی مگانیکی بدست آمده استفادهای گوناگونی میشود

از زمان تولد توربینهای گازی امروزی در مقایسه با سایر تجهیزات تولید قدرت,زمان زیادی نمی گذرد با این وجود امروزه این تجهیزات به عنوان سامانه های مهمی در امر تولید قدرت مکانیکی مطرح می باشند. از تولید انرژی وانرژی برق گرفته تا پرواز هواپیماهای مافوق صوت همگی مرهون استفاده از این وسیله سودمند می باشند . ظهور توربینهای گازی باعث پیشرفت زیادی در رشته های مهندسی مکانیک , متالورژی ، مهندسی شیمی،صنعت نفت و سایرعلوم مربوطه گشته است . بطوری که پیدایش سوپرآلیاژهای پایه نیکل و تیتانیوم به خاطر استفاده آنها در ساخت پره های ثابت و متحرک توربینها که دماهای بالایی در حدود ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد و یا بیشتر را متحمل می شوند, از سرعت بیشتری برخوردار شد . به همین خاطر امروزه به تکنولوژی توربینهای گازی تکنولوژی مادر گفته می شود و کشوری که بتواند توربینهای گازی را طراحی کند و بسازد هر چیز دیگری را هم می تواند تولید کند و باعث افتخار ماست که کشور عزیزمان ایران به توانایی ساخت و تعمیرات توربین گازی در صنعت نفت دست پیدا کرده است. همانطور که بیان گردید از این تجهیزات در نیروگاهها برای تولید برق (معمولا برای جبران باریک) موتورهای جلوبرنده (هواپیما ,کشتیها و حتی خودروها) , در صنایع نفت و گاز برای به حرکت درآوردن پمپها و کمپرسورها در خطوط انتقال فراورده ها و... استفاده می شود که امروزه کاربرد توربینهای گازی در حال گسترش می باشد. بیشتر هواپیماهای مدرن امروزی جهت تولید نیروی تراست(نیروی جلوبرنده) لازم برای حرکت، از موتورهای توربین گازی استفاده میکنند.

اصطلاح "Gas Turbine" به عنوان یک واژه ی عمومی برای انواع موتورهای توربینی مورد استفاده قرار میگیرد و در محدوده ی موتورهای جت شامل: توربوجت، توربوفن، توربوپراپ، توربوشفت و کلیه موتورهای توربینی که با مکانیزم جت کار میکنند میشود. از سایر سیستم های پیشرانشی که با شتاب سیال، تراست تولید میکنند ولی توربینی نیستند میتوان به: رمجت، اسکرمجت، پالس جت، پرشرجت،

http://www.mohandes-iran.com

واترجت و موتورهای راکتی اشاره کرد که هر کدام با مکانیزم و اصولی جدا کار میکنند و ساختمانی متفاوت از یکدیگر دارند.

موتورهای توربینی گونه های مختلفی دارند و با وجود اینکه هر یک از آنها متفاوت از دیگری است اما دارای قسمتهای مشترکی هستند. همه ی موتورهای توربینی دارای یک مجرای ورود هوا، یک کمپرسور یا متراکم کننده، یک بخش احتراق، یک توربین و یک مجرای خروجی هستند. همه ی این موتورها با یک اصول اساسی کار میکنند ولی هر کدام از آنها دارای مزایا و اشکالات مجزایی هستند. همه موتورهای توربینی جت با این قاعده کار میکنند :هوا به داخل لوله مانندی کشیده و فشرده شده، با سوخت مخلوط و سوخته شده با سرعت بالایی خارج میشود.

لازمه کار یک توربین ، وجود یک سیال کار مناسب ، یک منبع انرژی سطح بالا و یک منبع برای انرژی سطح پایین می باشد . هنگامی که سیال از درون توربین عبور می کند قسمتی از انرژی آن بطور مداوم به روتور منتقل شده و به کار مفید مکانیکی تبدیل می شود . توربین های بخار و گاز از انرژی حرارتی استفاده می کنند ، در حالیکه توربینهای آبی از انرژی جنبشی استفاده می کنند . اهداف اولیه یک طراح توربین حصول اطمینان از انجام این پروسه با حداکثر راندمان و داشتن نیروگاهی با حداکثر اعتماد در کمترین هزینه است. اهداف ثانویه اینست که نیروگاه به کمترین نظارت وکمترین زمان برای راه اندازی و بهره برداری نیاز داشته باشد . این اهداف پنجگانه با همدیگر مغایرت دارند . نتیجه نهایی یک هماهنگی قابل قبول بین آنها خواهد بود.

توربینهای گازی در صنعت برخلاف تفکر عموم که تصور میکنند فقط برای تولید برق و حرکت ژنراتور کاربرد دارد کاربردهای زیادی دارند توربینها به خاطر تنوع گونه های مختلف یکی ا پرکاربردترین اجزا صنعتی هستند ، توربین های گاز جدا از تولید برق به خاطر خصوصیات ویژه ای که دارند می تواند در موارد دیگری مثل موتورهای جت در هواپیماها برای تأمین نیروی محرکه هواپیما و نیروی جلوبرندگی به کار رود یا مثلاً جهت به گردش درآوردن یک پمپ قوی به کار رود.

http://www.mohandes-iran.com

فصل اول

آشنایی با توربین گازی

Introduction to Gas turbine

http://www.mohandes-iran.com

تعریف:

اسباب بازی ساده ای مثل فرفره را در نظر بگیرید که می‌توانیم با فوت کردن به آن، سبب چرخش آن شویم ؛ در واقع با دمیدن هوا به پره‌های فرفره سبب گردش آن شده ایم. در این فرایند ساده، دو عامل اصلی سبب ایجاد گردش فرفره یا به عبارت دیگر نیروی مکانیکی شده است. عامل اول هوای دمیده شده است که سیالی با انرژی جنبشی بالا می‌باشد و عامل دوم خود فرفره می‌باشد که می‌تواند انرژی جنبشی را به مکانیکی تبدیل نماید. از این قاعده ساده در صنعت برای تولید انرژی مکانیکی استفاده می‌شود. در واقع در صنعت دستگاههایی به نام توربین هستند که با استفاده از انرژی جنبشی سیال، انرژی مکانیکی تولید می‌کنند و سیال پر انرژی مورد استفاده، عموماً آب، باد، بخار، گازهای داغ حاصل از احتراق می‌باشد. البته بر اساس نوع سیال به کار گرفته شده توربین های آبی، بادی، بخاری و گازی طراحی و بوجود آمده‌اند.

آب‌های جاری و باد دو سیال با انرژی جنبشی بالا هستند که در طبیعت وجود دارند و بشر توانسته با ساختن توربینهای آبی و بادی از این انرژی پاک استفاده کند. اما بخار و گازهای حاصل از احتراق دو سیال پر انرژی هستند که توسط انسان با استفاده از منابع انرژی تولید می‌شوند تا به کمک آنها کار مکانیکی در توربین های بخار و گاز حاصل شود. تولید بخار در بویلرها و گازهای حاصل از احتراق در محفظه احتراق توربین گاز صورت می‌گیرد.

انرژی مکانیکی تولید شده در توربین‌ها معمولاً به صورت دورانی می‌باشد و لذا در صنعت برای چرخاندن دستگاههای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال توربین‌های بادی و آبی معمولاً برای چرخاندن ژنراتور و تولید برق در نیروگاههای بادی و آبی استفاده می‌شوند.

توربین‌های گازی در صنایع هواپیمایی به عنوان موتور محرک، در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی به عنوان محرک ژنراتور،کمپرسور و پمپ؛ و در نیروگاههای حرارتی به عنوان محرک ژنراتور استفاده می‌شوند. توربین بخار نیز در ابعاد مختلف و در بسیاری از صنایع به عنوان محرک ژنراتور، کمپرسور، پمپ و ... استفاده می‌شود.

http://www.mohandes-iran.com

لازم به ذکر است در ابتدا، توربین‌های گازی، عمدتاً در صنعت هواپیمایی مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ اما با افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی و لزوم استفاده از ماشینهایی با حجم کوچک، سرمایه اولیه کم و زمان راه‌اندازی کوتاه برای تبدیل انرژی گرمایی به کار مکانیکی، استفاده از توربین‌های گازی در صنایع دیگر، بالاخص صنعت برق و صنعت نفت روز به روز افزایش یافت.

توربین گازی یک موتوراحتراق داخلی چرخشی ازخانواده توربوماشینهااست که درذهن عموم موتورجت هواپیما بعنوان پرمصرف ترین کاربردآن شناخته شده است اساسًا این نوع موتور با احتراق اختلاف هوای فشرده وسوخت وعبورماحصل آن از یک سری دیسکهای چرخ ندۀ توربین کارمی کند که موجب بروز قدرت چرخشی یک شافت ویا ایجاد نیروی عکس العمل رانشی ویاترکیبی ازاین دوپدیده می شود

ساده‌ترین توربین‌ها یک بخش چرخنده و تعدادی پره دارند که به بخش اصلی متصل شده‌است سیال به پره‌ها برخورد می‌کند و بدین ترتیب از انرژی ناشی از متحرک بودن آن استفاده می‌کند به عنوان اولین توربین‌ها می‌توان آسیاب بادی و چرخاب را نام برد.

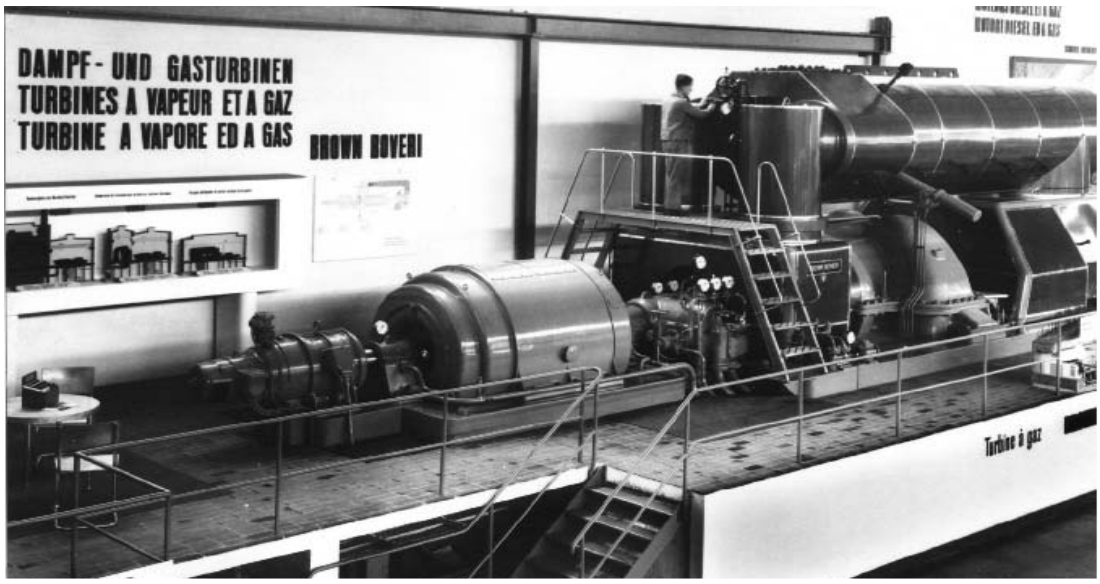
http://www.mohandes-iran.com

تاریخچه توربین گازی:

واژه توربین برای اولین بار به وسیله Claude Burdin در سال ۱۸۲۸ به وجود آمد که از لغت یونانی به معنی چرخنده یا سر گردان مشتق شده‌است

از حدود ۷۰ سال قبل توربین های گازی جهت تولید برق مورد استفاده قرار می گرفته اند، اما در بیست سال اخیر تولید این نوع توربین ها بیست برابر افزایش یافته است.نخستین بار، در150 سال پیش از میلاد الکساندریا از توربین گازی استفاده کرد. وی با استفاده از دود حاصل از آتش ، توربین را به حرکت در آورد. در همان زمان چینی ها از آسیاب های بادی استفاده می کردند. اولین طرح توربین گازی مشابه توربین های گازی امروزی در سال ۱۷۹۱ به وسیله «جان پایر» پایه گذاری شد

در سال ۱۸۰۸ اولین نوع توربین گازی انفجاری- که در مراحل بعدی شیرهایی در ورودی سوخت و خروجی محفظه ی احتراق آن ، برای کنترل انفجار در فضای بسته نصب شده بود- معرفی گردید. فشار حاصل از گاز، توربین را به طور موفقیت آمیز اما با کارایی بسیار پایینی به حرکت در آورد. خط تولید این توربین گازی در سال ۱۹۳۹، به دلیل طراحی مدل جدیدی از توربین گازی توسط براون باوری،برچیده شد



http://www.mohandes-iran.com

شکل صفحه قبل اولین توربین گاز –جنراتور صنعتی ساخته شده توسط براون باوری در کشور سویس که توان ۴۰۰۰ کیلو وات داشت در سال ۱۳۳۹ میلادی تاریخچه توربین گاز و توربین بخار در هم آمیخته است. و نمی‌توان بطور کامل تاریخچه توربین گاز و توربین بخار را از هم مجزا نمود. جان باربر (John Barber) اختراع عبور هر گونه سیال اعم از گاز یا مایع از توربین بخار که دارای انرژی پتانسیل باشد را بثبت رسانید. وی اینگونه مطرح نمود که مخلوط گاز کک (که در اثر گرم کردن ذغال سنگ بوجود می‌آید) با هوای فشرده شده پس از احتراق با سرعت زیاد جت مانند به پره‌های یک توربین شعاعی برخورد نموده و محور آن را به حرکت در می‌آورد که پس از مطالعات زیادی بالاخره در اوایل قرن بیستم اولین توربین گازی که از یک توربین چند طبقه عکس العملی و یک کمپرسور محوری چندطبقه تشکیل شده بود، تولید گردید.

اولین دستگاه توربین گازی در سال ۱۹۳۳ در یک کارخانه فولادریزی در کشور آلمان مورد بهره برداری قرار گرفت و آخرین توربین گازی با قدرت ۲۱۲/۲ مگاوات در فرانسه نصب و مورد بهره برداری می گردد در صنعت برق ایران اولین توربین گازی در سال ۱۳۴۳ در نیروگاه شهر فیروزه (طرشت) مورد استفاده قرار گرفته است که شامل دو دستگاه بوده و هر کدام ۱۲/۵ مگاوات قدرت داشته است. در حال حاضر کوچکترین توربین گازی موجود در ایران توربین گاز سیار «کاتلزبرگ» با قدرت اسمی یک مگاوات و بزرگترین آن توربین گازی ۴۹-۷ شرکت زیمنس با قدرت ۱۵۰ مگاوات می باشد.

http://www.mohandes-iran.com

صورت دسته بندی زمانی تاریخچه توربین گازی و موتور جت را میتوان بصورت جدول صفحه بعد نشان داد:

۱۳۰سال قبل از میلاد مسیح	الکساندریا توربین هوای داغ را برای به حرکت درآوردن اجسامی در جشنهای مذهبی ساخت.
۱۵۵۰ میلادی	لئوناردو داوینچی توربین هوای داغ را برای به حرکت در آوردن و چرخاندن گوشت برای بریان کردن آن استفاده کرد
۱۶۲۹م	گیوانی بارانسا که اهل ایتالیا بود توربین بخار ضربه ای رو اختراع کرد
۱۷۹۰م	جان باربر انگلیسی مشخصات توربین گازی را با ارائه دادن الگوی سیکل ترمو دینامیکی توصیف کرد و آنرا برای موتور جت پیشنهاد کرد
۱۸۰۷م	جورج کالی موتور هوای داغ با توربین نوع عکس العملی را اختراع کرد که این موتور نحوه کارش همانند توربین های گاز امروزی بود
۱۸۱۸م	جیمز ژول فیزیکدان انگلیسی تئوری سیکل توربین گازی را بررسی و ارائه داد که با نام سیکل ژول معروف است
۱۸۲۴م	کارنو مقدمات اولیه تئوری موتور جت (توربین گاز) را ارائه کرد
۱۸۲۷م	رابرت استرلینگ برای موتور هایی که در سیکل هوای داغ کار میکنند مبدل حرارتی را اختراع کرد
۱۸۳۷م	برسون اولین توربین گازی با کمپرسور چرخشی را طراحی کرد
۱۸۳۱م	ویلیام آوری آمریکایی توربین بخار رو اختراع کرد
۱۸۴۶م	بوردن استفاده از کمپرسور و توربین چند مرحله ای را پیشنهاد کرد
۱۸۷۲م	دکتر استالز اولین توربین گازی امروزی را طراحی کرد
۱۸۸۴م	چارلز پارسون طراحی توربین گازی را با جزییات بیشتری ارائه داد
۱۹۰۲م	موس دستگاه آزمایش توربین گازی را در دانشگاه کرنل نصب کرد(توربوچارجر)
۱۹۰۵م	سوسیتی اولین توربین گازی را که ۴ ٪ بازدهی داشت را در پاریس راه اندازی کرد
۱۹۰۸م	هلزورس اولین توربین گازی را با حجم ثابت ساخت
۱۹۲۰م	شرکت تیسن توربین گازی هلزورس را به عنوان موتور قطار ایالتی بکار برد

http://www.mohandes-iran.com

۱۸۳۰م	فرانک ویتل اولین طرح توربین گازی جت را ارائه داد و هواپیما با موتور توربین گازی ساخته شده توسط خود فرانک ویتل به پرواز در آمد ساخته شده توسط خود فرانک ویتل به پرواز در آمد
۱۹۴۰م	توربین گازی با سیکل بسته بکار گرفته شد
۱۹۴۸م	توربین گازی با سیکل نیمه باز در سوییس آزمایش شد
۱۹۵۶م	بسته با سوخت پودر زغال آزمایش شد
۱۹۵۹م	رزمایش نیروی دریایی سلطنتی انگلیس با بکار گیری سیکل ترکیبی بخار و توربین گاز آزمایش شد
۱۹۶۰م	شرکت جنرال الکتریک واحد ترکیبی بخار و گاز را بکار گرفت
۱۹۶۱م	انگلیسی ها هاور کرافت با موتور توربین گاز را بکار بردند
۱۹۶۲م	شبکه تولید برق انگلستان واحد گازی به ظرفیت ۱۷.۵ مگاوات را آزمایش کرد
۱۹۶۳م	اتومبیل مجهز به توربین گازی جایزه ی مخصوص مسابقه ۲۴ ساعته لیمانس را دریافت کرد.
1966م	توربین گازی در سکوی نفتی به کار گرفته شد

در واقع با پیدایش توربینهای گازی تحول عظیمی در صنعت انرژی و بهینه سازی آن بوقوع پیوست که در ادامه باعث راندمان کار در اقتصاد مهندسی شد.

در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی اولین توربین گازی برای تولید برق در شبکه مورد استفاده قرار گرفت. از آن سال تاکنون تغییرات زیادی در جهت بهبود کارایی توربین اعمال شده است.

http://www.mohandes-iran.com

انواع توربین:

کاربردهای توربین گازی در صنعت، به طور کلی به دو شاخهٔ اصلی تقسیم می شود :

الف- توربینهایی که در صنعت هواپیمایی استفاده می شود.

ب- توربینهایی که در سایر صنایع به کار برده می شود .

این دو گروه به دلیل متفاوت بودن از نظر کاربری، نکات متمایزی را در طراحی توربین گازی به وجود می آورند. موارد زیر را به عنوان شاخصهای اصلی می توان نام برد :

الف- اجزای توربینهای گازی صنعتی معمولاً برای حدود یکصد هزار ساعت کار طراحی می شود در حالی که برای توربینهای صنایع هواپیمایی، شاخصهای دیگری مطرح است.

ب- ابعاد هندسی و وزن، برای توربینهای گازی صنعتی اهمیت زیادی ندارد، اما توجه به این دو مشخصه در طراحی توربینهای گازی مورد استفاده در صنایع هوایی حائز اهمیت است؛

ج- از انرژی جنبشی دود خروجی توربینهای صنایع هوایی، استفاده می شود، در حالی که در توربینهای صنعتی، این انرژی تلف می گردد. لذا لازم است انرژی جنبشی تولید شده در توربینهای گازی صنعتی، تا حد ممکن کاهش یافته و کنترل گردد .

اگرچه موارد ذکر شده تفاوتهایی اساسی را در طراحی به وجود می آورد اما سرمایه گذاری و نتایج تحقیقات انجام شده در صنایع هواپیمایی، در سایر صنایع مرتبط با توربینهای گازی صنعتی نیز، بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. طوری که با اصلاحات و تغییرات انجام گرفته روی مدلهای مختلف، انواع پیشرفته تر و با کارایی بالاتری طراحی و ساخته می شود. تفاوتهای این دو نوع توربین گازی، بیشتر در سیستم یاتاقان، محفظهٔ احتراق مناسب برای مصرف سوختهای ارزان قیمت، توربین قدرت و سیستم کاهش سرعت برای بهره برداری در بارهای پایین است.

http://www.mohandes-iran.com

بطور کلی توربینهای صنعتی را می توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود:

۱) توربین های بخار(Steam turbine)

این نوع توربین ها از قدیمی ترین توربین های مورد استفاده در صنعت می باشند.

در این نوع توربین ها، از نیروی بخار (که در دیگ بخار تولید می شود) جهت بحرکت در آوردن توربین ها استفاده می شود. برای تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی که از ذغال سنگ، نفت و انرژی هسته‌ای استفاده می‌کنند به کار برده می‌شوند روزی از آنها برای هدایت وسایل نقلیه مانند کشتی استفاده می‌شد این توربین ها به دلایل زیر کمتر مورد استفاده اند:

- به دیگ بخار و وسایل دیگر نیاز دارند.
- هزینه نگهداری بالایی دارند.

۲) توربینهای گازی انبساطی(Expansion Gas turbine)

توربینهایی که گازطبیعی بافشارو حرارت معینی وارد توربین شده به تیغه ها برخوردکرده وسبب چرخش توربین می شود. در توربینهای انبساطی گازگرم شده با فشار معین به تیغه های Rotor " Blades " توربین برخورد کرده و آن را می چرخاند

۳) توربین های گازی احتراقی (combustion Gas turbine)

در این نوع توربین ها مقداری سوخت(عمدتا گاز طبیعی) و هوای فشرده با نسبت معین مخلوط شده و و در محفظه احتراق می سوزند(عمل احتراق صورت میگیرد). در اثر سوختن و ایجاد حرارت حجم گاز افزایش می یابد.گاز با حجم زیاد و فشار و دمای معین به تیغه های توربین برخورد می کند و سبب چرخش توربین می شود.توربینهای گازی احتراقی رستون ، سلار ، ورکسپور ، براون باوری ، رولزرویس ، از توربینهای احتراقی موجود در صنعت نفت می باشند .

۴) توربین های آبی(Hydraulic turbine)

در توربین های گاز ممکن است یکی از دو نوع سوخت گازوئیل یا گاز طبیعی استفاده شود. توربین های

http://www.mohandes-iran.com

گازی را از روی عمل انبساط گازها (مانند توربین بخار) تقسیم بندی می کنند که عبارتند از:

۱. توربین های ضربه ای
۲. توربین های ضربه ای- عکس العملی

توربین های گاز را از روی مسیر سیال عامل نیز طبقه بندی می کنند که عبارتند از:

۱. توربین های گازی با سیکل باز :سیال عامل از هوای بیرون موتور وارد و به داخل هوای محیط تلمبه می گردد.
۲. توربین های گاز با سیکل بسته : سیال عامل در داخل دستگاه گردش می‌کند
۳. توربین های گاز با سیکل نیمه بسته :مقداری از سیال عامل در داخل دستگاه گردش می کند و مقدار دیگر به داخل هوای محیط تخلیه می گردد.

تقسیم بندی توربین‌های گازی براساس فرآیند احتراق:

۱. احتراق پیوسته (فشار ثابت):
۲. انفجاری (حجم ثابت):

انواع توربین های گازی :

۱- **توربین گازی تک محوری : single-shaft gas turbine**

اگر استفاده از توربین گازی به منظور تولید توانی ثابت (سرعت و تولید ثابت) مدنظر باشد در این صورت به کارگیری توربین گازی تک محوری مناسبتر است در این نوع واحدها ، کارایی در حالت تولید توان پایین ، کم بوده و لذا مورد توجه نیست .

http://www.mohandes-iran.com

۲- توربین گازی دو محوری : two-shaft gas turbine

نوع دیگر توربین گازی دو محوری است که در آن ، از محورها با سرعت متفاوتی بهره برداری می‌شود هر یک از این محورها، توربینی با توان متفاوت دارد و برای شرایطی که محدوده وسیعی از توان مورد نیاز است از آن استفاده میشود این نوع واحدها در حمل ونقل زمینی و دریایی مانند راه آهن و مقاصد دریایی به کار گرفته می شود این نوع توربین دارای یک توربین گازی فشار بالا و یک توربین گازی فشار ضعیف است توان حاصل از توربین گازی فشار بالا صرف چرخاندن کمپرسور می شود توربین قسمت فشار ضعیف انرژی لازم برای مصرف را که توان آن ثابت نبوده و بستگی به مصرف کننده دارد (که در حال تغییر است) تولید می کند.

انواع دیگری از توربینها:

توربین‌های ترانسونیک :جریان گاز در اکثر توربین‌ها همواره سرعتی زیر صفر دارد در این نوع توربین‌ها سرعت گاز هنگام خروج بالاتر از صفر است. این توربین‌ها در فشار بالاتری کار می‌کند ولی معمولاً بازده کمی دارند و خیلی هم مرسوم نیستند.

توربین‌های کنترا رتاتینگ :دو توربین که یکی بالا دیگری پایین در جهت مخالف هم می‌چرخند این سیستم پیچیدگی‌هایی دارد که تولید آن را کاهش می‌دهد.

توربین‌های سرامیک :توربین‌های با فشار بالا که از آلیاژ نیکل و فولاد ساخته شده‌اند معمولا دارای سیستم‌های خنک کننده پیچیده هستند اخیرا پره‌های سرامیکی روی توربین‌های گازی امتحان شده‌است.

به دلیل اهمیت بالای توربین های گازی در صنعت نفت و گاز و نیروگاهی ، در ادامه به طور عمده این نوع توربین ها بهمراه تشریح کی آنها مورد بررسی قرار میگیرد.

http://www.mohandes-iran.com

اگر بخواهیم توربینهای گازی رو به شکل فنی تر توشیح دهیم نحوه کار یک توربین گازی به این صورت است که ابتدا هوای تازه از طریق کانال ورودی ، وارد توربین شده و سپس هوای ورودی به کمک یک کمپرسور محوری فشرده می شود .پس از آن به هوای فشرده

شده،سوخت گاز تزریق گردیده و می سوزد و طی این فرآیند، سطح انرژی آن افزایش می یابد سپس سوخت محترق شده که دما و فشار بالایی دارد به یک توربین انبساطی یا expansion turbine هدایت می شود و درآنجا انرژی گاز به انرژی مکانیکی تبدیل شده و باعث چرخش محور توربین می گردد.تبادل انرژی در توربین واقع در دو مرحله اتفاق می افتد .در نازل ورودی توربین ،گاز داغ ، منبسط می شود و بخشی از انرژی حرارتی آن به انرژی جنبشی تبدیل می شود .سپس در قسمت پره های توربین، انرژی جنبشی به پره های در حال چرخش منتقل شده و به کار تبدیل می شود .بطور معمول بیش از 50 % کاری که توسط توربین تولید می شود ، صرف چرخاندن کمپرسور محوری می گردد.

توربین گازی ماشینی است که با هوای محیط کار می کند ، در نتیجه با تغییر عوامل موثر بر شدت جریان جرمی هوای ورودی ،عملکرد توربین نیز تغییر می کند .لذا در طراحی ،شرایط مرجع برای متغییرهای توربین ، فشار ۱۴.۷ و دمای ۵۹ درجه فارنهایت در نظر گرفته می شود.

طبق پارامترهای مربوطه به راندمان توربین ، دمای محیط ، روی شدت جریان هوای ورودی تاثیر گذاشته و در نتیجه پارامترهای مختلف توربین و بازده آنها از جمله توان خروجی ، مصرف انرژی حرارتی ، جریان خروجی از اگزوز و شدت انتقال حرارت را تحت تاثیر قرار می دهد.در صورتیکه از سوختی با ارزش حرارتی کمتر استفاده شود بدلیل افزایش مصرف سوخت و هوا ،میزان شدت جریان جرمی توربین افزایش می یابد در نتیجه احتمال نزدیک شدن نسبت تراکم کمپرسور محوری به محدوده سرج زیاد میشود . این بدان معناست که برای کار کردن توربین ، حجم زیادی سوخت نیاز است.در نتیجه افزایش حجم سوخت باعث می شود فشار خروجی کمپرسور به عقب رانده شود و نهایتا درکمپرسور، یک جریان برگشتی ایجاد شود .

http://www.mohandes-iran.com

سیالات مورد استفاده در توربین:

هوا **:**در توربین بادی در نیروگاه های بادی

آب :در توربین آبی در نیروگاه های آبی

بخارات قابل میعان: در توربین بخار در نیروگاه های سوخت فسیلی مانند

نیروگاه گازی، و نیروگاه های انرژی های نو مانند نیروگاه اتمی و ...

گاز (هوا،گاز طبیعی، هلیوم و ....): در توربین های گازی

اجزاء توربین گازی:

به طور کلی اجزا اصلی یک توربین گازی عبارتند از:

الف : دستگاه مولد گاز که شامل :

۱) وسیله ای برای فشرده کردن هوا یا **کمپرسور (Compressor)**
۲) بستری برای انجام واکنش احتراق یا **محفظه احتراق (Combustion Chamber)**
۳) وسیله ای برای استخراج کار یا **توربین (Turbine)**

که بنا به کاربرد قسمتهای دیگری نیز برای افزایش راندمان و کارایی به آنها اضافه می شود . به عنوان مثال در برخی از موتورهای هواپیماها قبل از کمپرسور از دیفیوزر و بعد از توربین از نازل استفاده می شود

ب: دستگاه مولد نیرو که شامل :

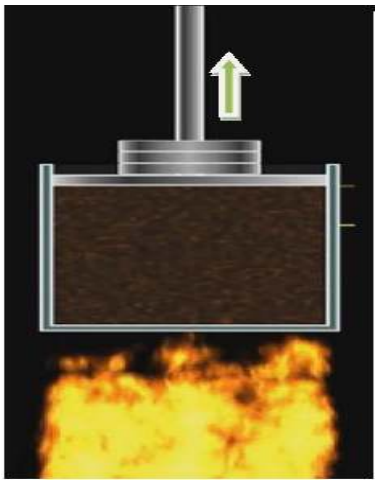
۱) توربین بار Power Turbine
۲) جعبه دنده Gear box

http://www.mohandes-iran.com

اصول عملکرد توربین گازی:

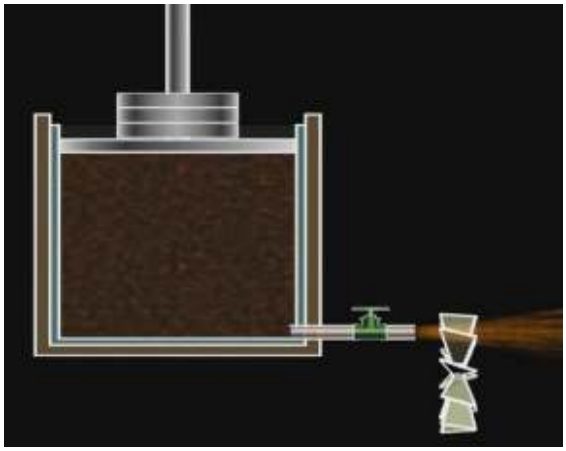
طبق تعریف، کار مکانیکی عبارت است از حاصلضرب نیروی مقاوم در جابجایی $W=F\times\Delta x$. برای استخراج کار مکانیکی از انرژی ذخیره شده در گاز، باید به نحوی آن را منبسط کرد، اما این انبساط تنها در شرایط خاصی می‌تواند تولیدکار نماید. فرض کنید به گاز داخل یک سیلندر، که در فشار اتمسفر قرار دارد ، گرما بدهیم در اثر گر م شدن، گاز منبسط می‌شود و بخشی از آن، از سیلندر خارج می‌شود، بدین ترتیب چون هیچ نیروی مقاومی در برابر این انبساط وجود ندارد تا جابجا گردد، کاری هم تولید نمی‌شود. به عبارت دیگر برای اینکه بتوان از این انبساط حجم کاری بدست آورد باید یک نیروی مقاوم در برابر انبساط گاز وجود داشته باشد. برای ایجاد این نیروی مقاوم میتوانیم با یک پیستون گاز را محبوس کرده و نیرویی بر روی پیستون وارد نماییم. با این کار، گاز در داخل سیلندر فشرده می‌شود. مقدار کار صرف شده برای ایجاد این فشرده سازی، برابر با mgx_1 می‌باشد.

چنانچه در زیر این سیلندر شعله ای قرار گیرد، در اثر بالا رفتن دمای سیلندر، گاز شروع به انبساط می‌کند، ولی نیروی وارده بر خلاف نیروی انبساط گاز، فشار وارد می‌کند. با حرارت دهی بیشتر، نیروی حاصل از انبساط گاز، بر نیروی وارده غلبه کرده و پیستون را بالا می‌برد. در نهایت بر اثر انبساط گاز، جابجایی بوجود می‌آید که به مفهوم انجام کار می‌باشد. مقدار این کار، برابر است با میزان نیروی مقاوم وارده در مقدار جابجایی آن یعنی mgx_2 . این مقدار کار را می‌توان از طریق پارامترهای مربوط به سینلدر تعریف کرد. به عبارت دیگر کار انجام شده برابر است با حاصل ضرب فشار در تغییر حجم سیلندر $W=P\times\Delta V$.



http://www.mohandes-iran.com

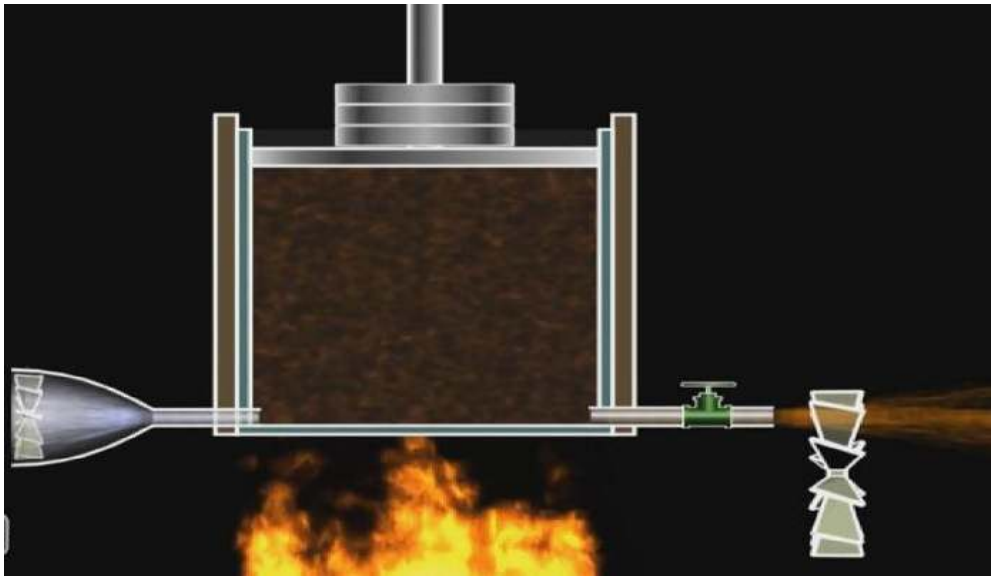
اگر از اتلاف انرژی در این سیستم صرفنظر نماییم، با خاموش شدن شعله زیر سیلندر، دیگر پیستون بالاتر نرفته و در ارتفاعی ساکن می‌ماند. در این حالت فشار درون سیلندر برابر با P می‌ماند. حال از پایین این سیلندر و بوسیله یک شیر، مجرایی به بیرون باز می‌کنیم و پره‌ای را در مقابل مسیر خروج گازها قرار می‌دهیم. با بازشدن شیر، جریانی از گاز تحت فشار به بیرون از سیلندر جریان می‌یابد. در حین خروج گاز از شیر، سرعت آن افزایش یافته و پس از برخورد با پره، سبب چرخش آن می‌شود.



به عبارت دیگر با حرکت پره انرژی جنبشی گاز به کار مکانیکی تبدیل می گردد با فرض ثابت بودن سرعت حرکت پیستون فشار داخل سیلندر تقریبا ثابت می ماند.به مرور زمان و با خروج گاز پایین می آید تا جاییکه همه گاز درون سیلندر تخلیه گردد و دیگر گازی برای خارج شدن باقی نماند.در این زمان فشار درون با فشار محیط برابر میشود با صفر شدن اختلاف فشار محیط و درون سیلندر، دیگر جریان هوایی با انرژی جنبشی بالا برای چرخاندن پره وجود نخواهد داشت و لذا پره از حرکت باز می‌ماند. برای آنکه بتوانیم در پره حرکت مستمر داشته باشیم، باید مقدار انرژی جنبشی مورد نیاز را در مقداری خاص حفظ نماییم. به عبارت دیگر اختلاف فشار هوای درون و بیرون سیلندر باید ثابت باشد. فشار محیط برابر اتمسفر و ثابت است، در نتیجه فشار درون سیلندر نیز باید حفظ شود تا اختلاف فشار ثابت بماند. به همین دلیل با خارج شدن هوا از داخل سیلندر، باید به شکلی آنرا جبران نمود.

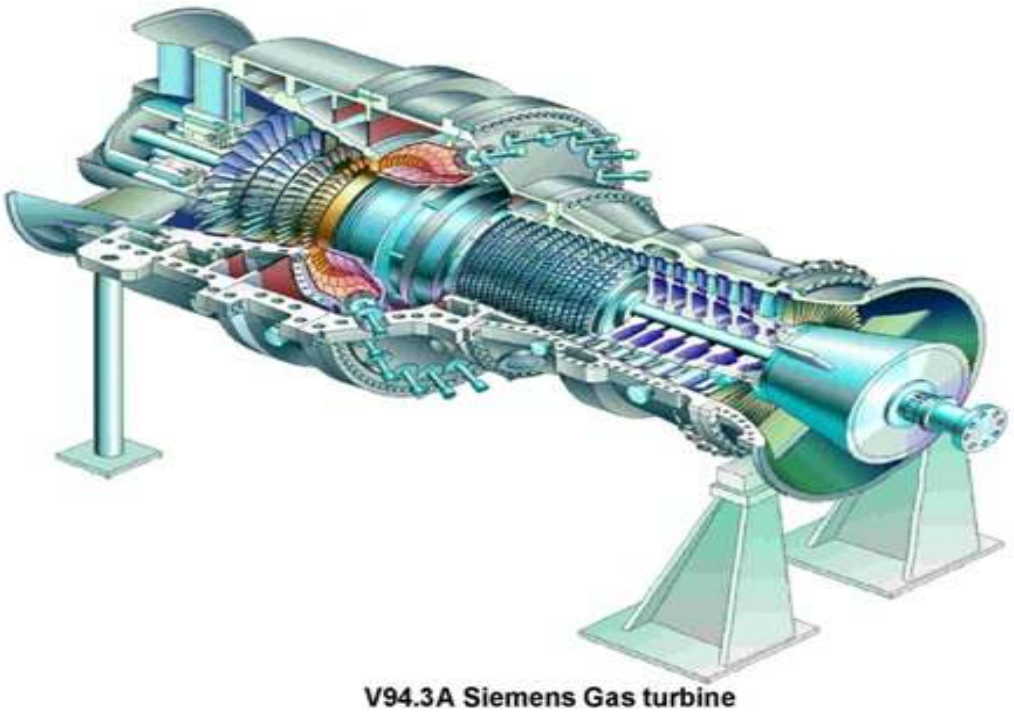
http://www.mohandes-iran.com

برای حصول این مقصود، از نقطه ای دیگر در سیلندر، مقدار هوای معادل با هوای خارج شده، وارد می‌گردد. برای اینکه بتوانیم دائماً به سیلندر هوای جایگزین وارد نماییم، باید هوای ورودی دارای فشاری بالاتر از فشار سیلندر باشد. لذا باید انرژی صرف شود تا هوایی با فشار بالاتر تولید و درون سیلندر تزریق شود. این انرژی را می‌توان از کار تولید شده در پره‌ها تامین نمود. همانگونه که مشاهده شد، با گرم کردن هوای فشرده شدهٔ درون سیلندر، حجم آن افزایش یافته و انرژی پتانسیل آن نیز افزایش می‌یابد. این انرژی افزوده شده، با گرداندن پره به انرژی مکانیکی قابل استحصال تبدیل می‌شود. در نتیجه برای استمرار کارکرد پایدار سیستم باید به طور مداوم انرژی گرمایی به هوای فشرده شده، تزریق شود.



این مثال ساده اساس کارکرد توربین های گازی می‌باشد. ابتدا هوا در بخشی به نام کمپرسور فشرده می‌شود تا وارد محفظه احتراق گردد. در محفظه احتراق با سوزاندن سوخت فسیلی، هوای فشرده تزریقی گرم می‌شود و تولید سیال با انرژی جنبشی بالا می‌نماید. این سیال به سمت پره های توربین هدایت می‌شود تا به کمک آن کار مکانیکی تولید نماید. کار تولید شده صرف چرخاندن کمپرسور هوا و دستگاههای دیگر مانند ژنراتور می‌گردد.

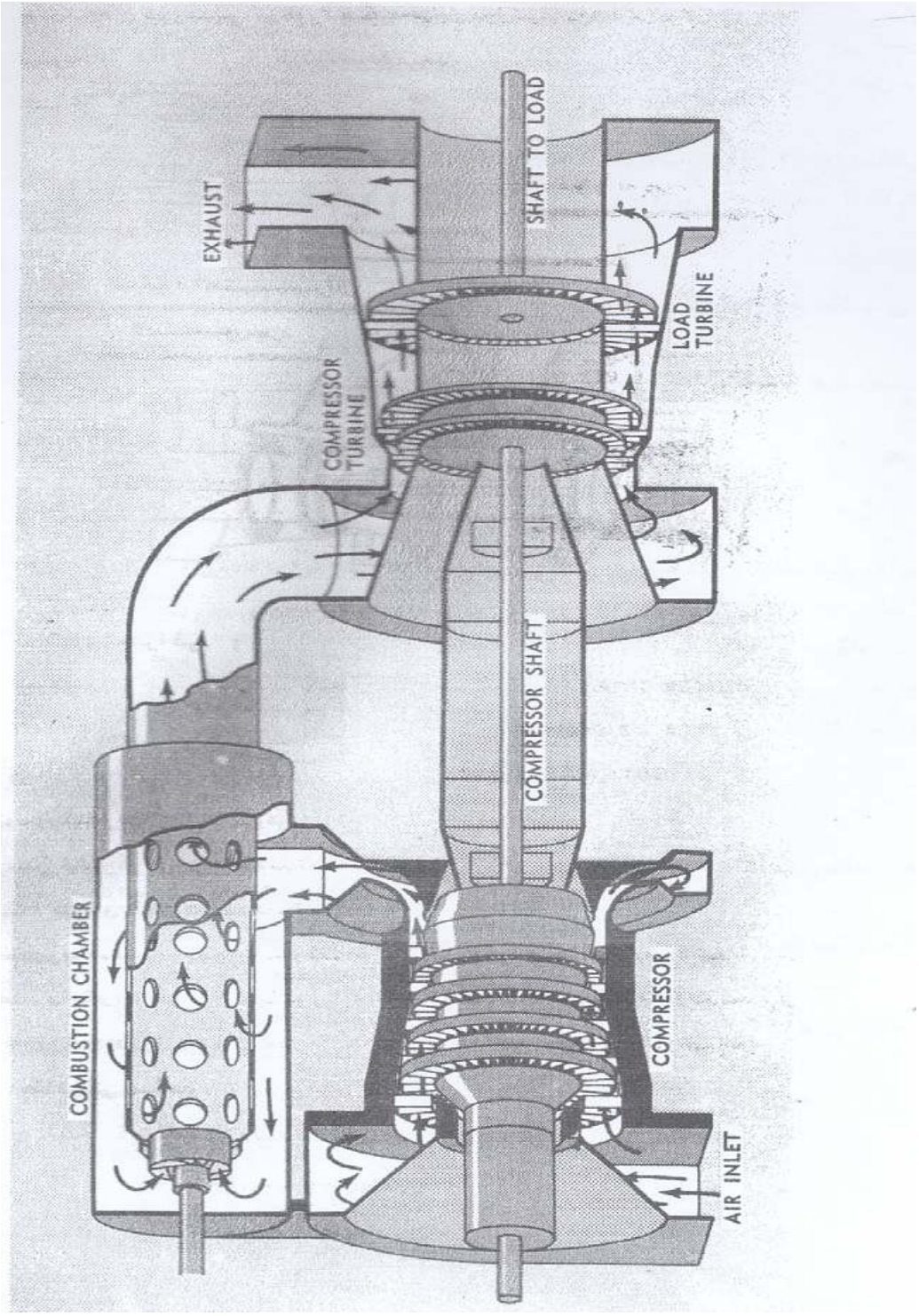
http://www.mohandes-iran.com



V94.3A Siemens Gas turbine

در تصاویر بالا به ترتیب اول کمپرسور سپس محفظه احتراق و در آخر توربین قرار دارد.

http://www.mohandes-iran.com



نمونه ای از اجزای یک توربین گازی دو محوره به همراه یک توربین قدرت

www.mechanicspa.mihanblog.com

وبلاگ مهندسی مکانیک – وبلاگ جامع مهندسی مکانیک

http://www.mohandes-iran.com

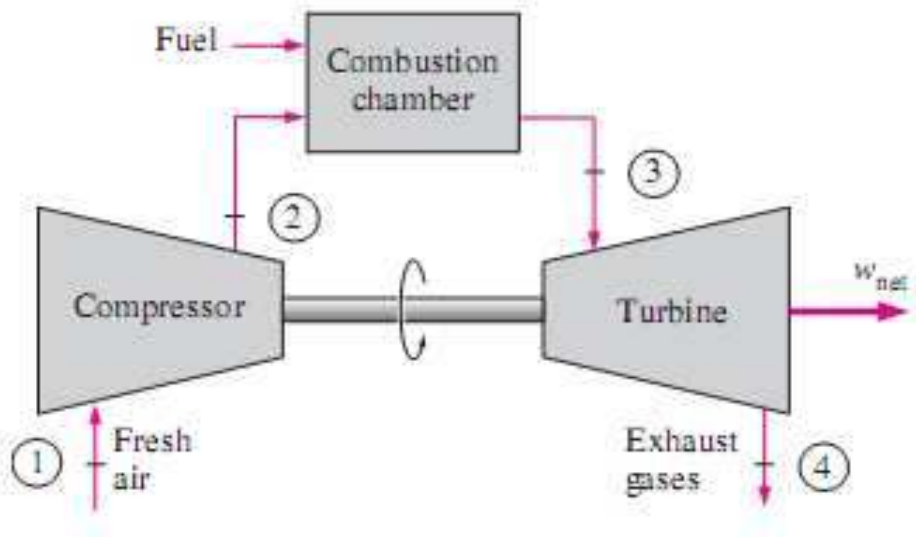
فصل دوم

اجزای توربین گازی

Gas turbine components

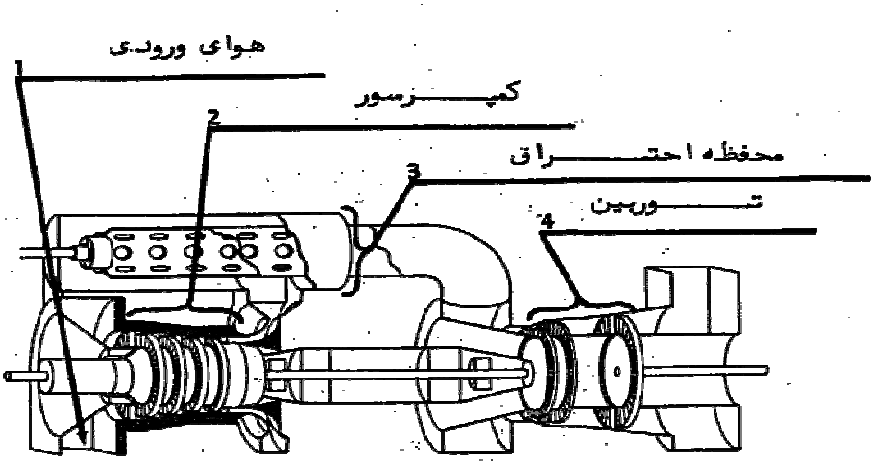
http://www.mohandes-iran.com

پایه و اساس توربین گازی یک کمپرسور هوا و یک اتاق احتراق و یک توربین است که پشت سرهم وبه صورت سری دریک مجموعه قرارگرفته اند . شکل ساده آن در زیر رسم شده است . بدوًا هوای ورودی فشرده می شود وسپس وارد اتاق احتراق می گردد . که دراثر مکانیزم احتراق همراه باسوخت موجب افزایش فشار و درجه حرارت گاز می شود . نهایتًا این گازدریک توربین منبسط می شود که موجب چرخش آن می شود . توربین کمپرسوررامی چرخاند ومازاد انرژی آن به صورت عکس العمل رانشی یاقدرت مکانیکی وتلفیقی ازاین دو درانتهای شافت خروجی ظاهرمی شود. هرتوربین گازی برهمین اساس ولی بامتغیرهای متفاوت کارمی کند تعداد مراحل ویا آرایش آن می تواند تغییر کند ولی همواره مراحل فشارافزائی احتراق (گرما افزائی) ودرانتها انبساط سیال(هوای داغ فشرده) بدنبال هم وبه صورت همسان درتمامی تورینها موجب تولید قدرت می شود . این مجموعه ممکن است ابتدا کمی پیچیده به نظربرسد ولی باتشریح موارد ضمن آشنایی بااجزاء مختلف تمامی رفتارآن مشخص خواهد شد. همانطور که قبلا بیان شد توربینهای گازی از ۳جزء اصلی به نام کمپرسور و محفظه احتراق و توربین تشکیل شده است.شکلهای زیر احزای یک توربین گازی را نشان میدهد.



اجزای یک توربین گازی احتراقی

http://www.mohandes-iran.com



کمپرسور(compressor):

با توجه به وظیفه اصلی یک توربین گاز که تبدیل انرژی نهفته در سوختهای فسیلی به انرژی مکانیکی و کار است به منظور فراهم نمودن شرایط ایده آل برای واکنش احتراق و ترکیب کامل اکسیژن با سوخت اطاق احتراق نیاز به حجم زیادی هوای فشرده دارد که این هوا توسط یک کمپرسور تامین میگردد کمپرسورهای مورد استفاده در توربین گاز، هوا را از اتمسفر مکیده و فشار آن را تاچندین برابر فشار اتمسفر زیاد میکند.

دونوع کمپرسورهوا درتوربینهای گازی مورد استفاده قرارمی گیرد . این دونوع عبارتنداز:

۱) **کمپرسورهای گریز از مرکز با جریان شعاعی Centrifugal compressor**

۲) **کمپرسورهای دوار با جریان محوری Axial flow compressor**

درکنارتوجه به راندمان اندازه وعمرکمپرسورازعوامل مهم انتخاب انواع کمپرسور است درمقام مقایسه کمپرسورجریان محوری باکمپرسورجریان شعاعی ، قطرکمپرسورجریان محوری کوچکتر و طول آن بیشترازکمپرسورجریان شعاعی است . هم محوری جریان سیال درکمپرسورهای جریان محوری آنرا بخصوص برای کاربرد درموتور هواپیما موثرترساخته است ازطرف دیگرکمپرسورجریان شعاعی درشرایط نا مناسب عملیاتی عکس العمل نامناسب تری ازخود نشان می دهد . هواپیما های بزرگ وموتورهای زمینی صنعتی تقریبًا وتمامًا ازکمپرسورهای جریان محوری استفاده می کنند . بدلیل راندمان نسبتًا بالای کمپرسورهای جریان شعاعی ونیزملاحظات ابعادی وهم چنین دربعضی اوقات درعملیات مدالهای

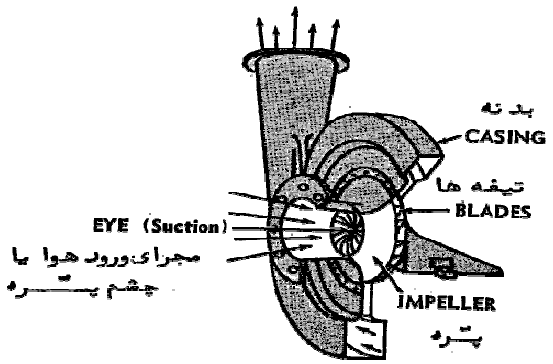
http://www.mohandes-iran.com

صنعتی ازاین کمپرسورها استفاده می شود . کمپرسور یا پمپ دستگاهی مشابه توربین است ولی با عملکرد بر عکس به طوری که این دستگاه انرژی را می‌گیرد و باعث حرکت یک سیال می‌شود.

عوامل موثر در انتخاب نوع کمپرسور عبارتند از:

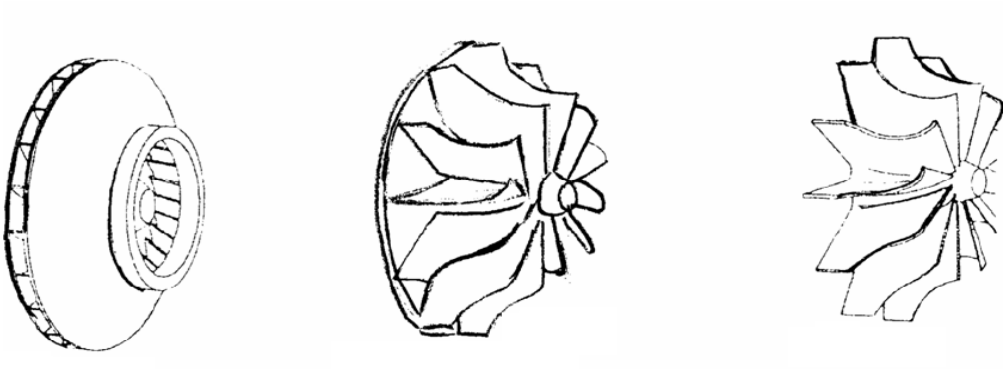
- ✓ بازده کمپرسور
- ✓ اندازه
- ✓ عمرکمپرسور

کمپرسورهای گریز مرکز (Centrifugal compressor):در کمپرسورهای گریز از مرکز حجم هوائی که تولید می کنند نسبتاً خوب است و از محاسنی که دارد کوچک و محکم و کم خرج بودن آن است لذا در بعضی از هواپیماها و توربین های کوچک رستون T.E استفاده می شود . این نوع کمپرسورها که درهواپیماهای اولیه توربینی بکارمی رفتند نسبت به کمپرسورهای جریان محوری از نظرساختمان ساده تراند.یک کمپرسورگریزازمرکز انرژی تامین شده ازطر یق محرکه را به سیال منتقل می کند . این انرژی به سرعت سیال ، فشار سیال و یا تلفیقی ازاین دو تبدیل می شود . چگونگی تغییر وتبدیل انرژی درتمامی کمپرسورهای گریزازمرکز تقریبًا یکسان است .عامل تبدیل انرژی که موتوربه چرخش درمی آید پروانه(impeller) نام دارد .یک کمپرسور گریز از مرکز و انواع پروانه در شکل زیر نشان داده شده است.

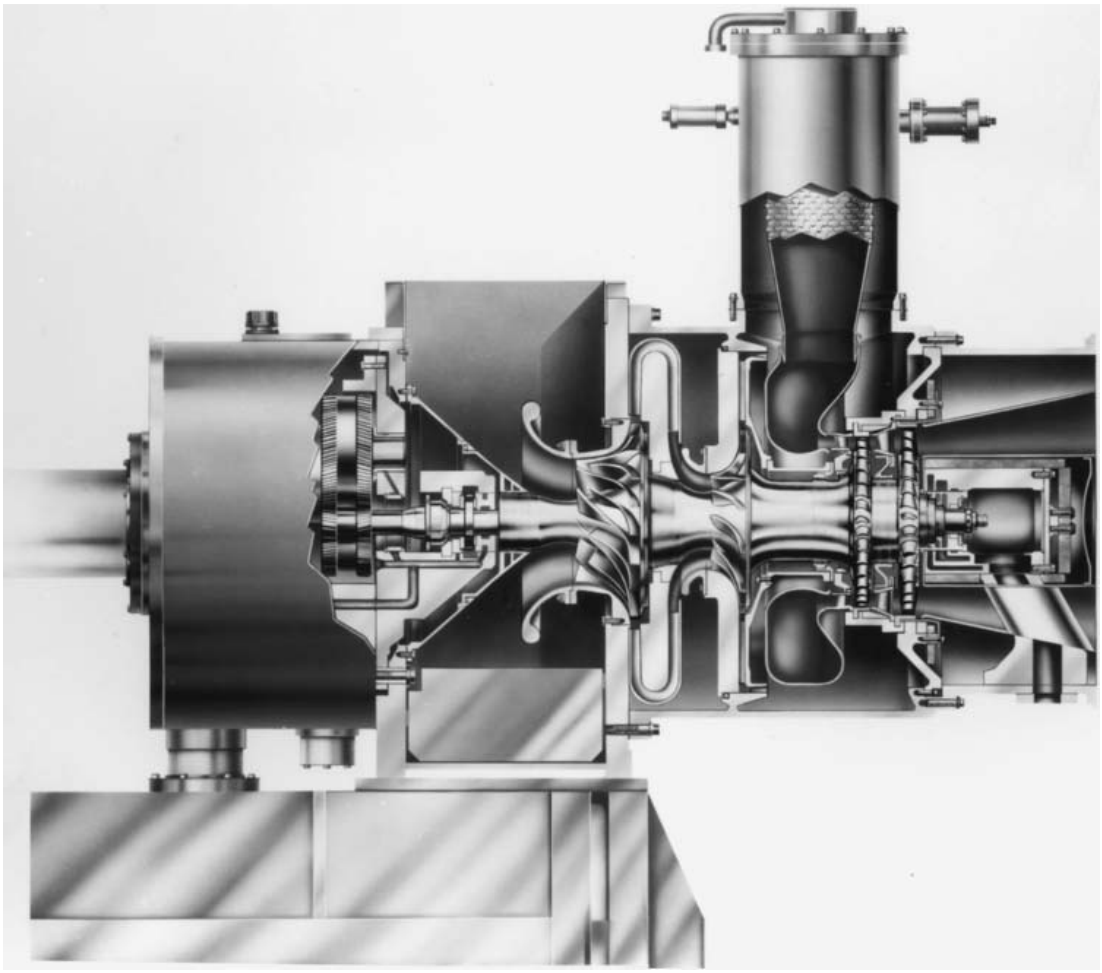


کمپرسورگریزازمرکز

http://www.mohandes-iran.com



نمونه ای از پره های کمپرسور گریز از مرکز از سمت راست به چپ: بسته(closed) نیمه بسته(semi-closed) و باز (open)

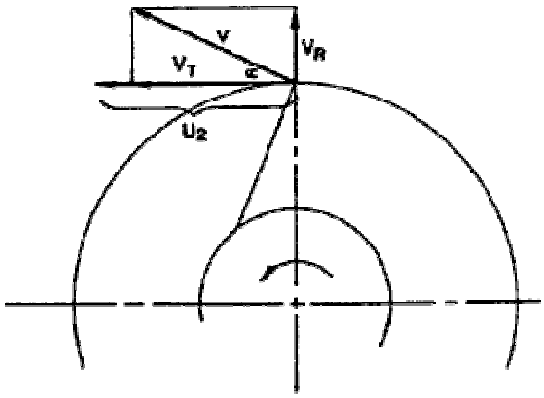


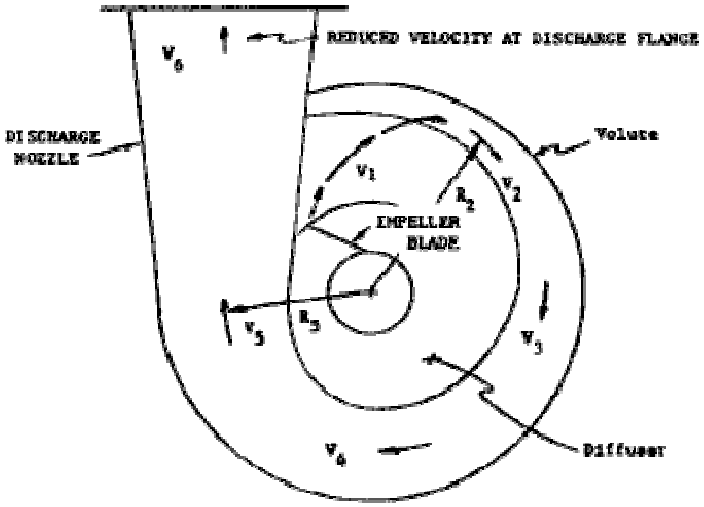
نمونه ای از یک کمپرسور گریز از مرکز

http://www.mohandes-iran.com

مولفه های سرعت برای سیال در پروانه کمپرسور به صورت زیر است:

V_R درجهت شعاعی و موازی راستای تیغه به سمت بیرون ازمرکز پروانه که ناشی از نیروی گریزازمرکز است.V_T که مماس برمحیط پروانه در نقطه نوک تیغه ودرجهت چرخش پروانه است .برآیند عملی این دو سرعت مولفه سومی است (V) که سیال را با سرعت وفشار و با زاویه معینی(α) ازنوک تیغه پروانه خارج می کند .در شکل فوق V_T سرعت حرکت نوک تیغه است.میزان افزایش سرعت دراین مقطع(در پروانه ها) به مراتب بیشترازافزایش فشاراست .





چگونگی کاهش سرعت در شیپور

http://www.mohandes-iran.com

اجزای شیپوره (Volute):

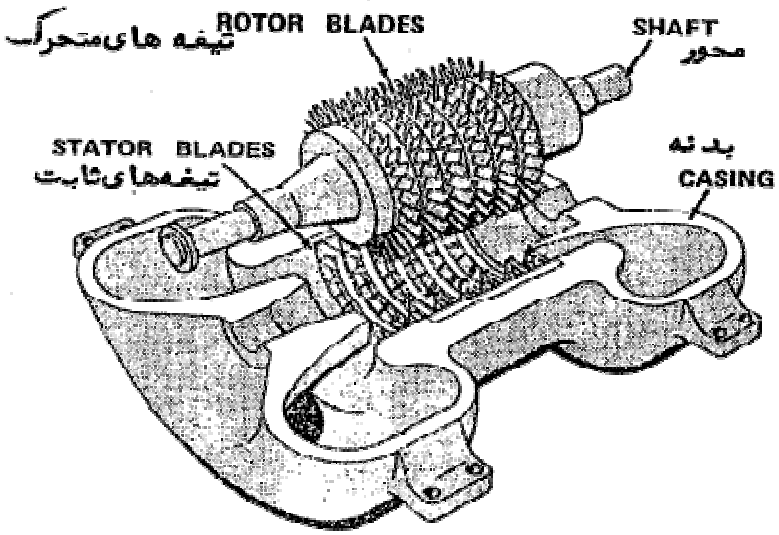
نقطه زبان پوسته(Tongue of Casing): پوسته کمپرسور گریز از مرکز طوری طراحی شده است که دریک نقطه کاملا نوک تیز می شود که به آن نقطه زبان پوسته می گویند ازنقطه زبانه تانقطه خروجی ازپوسته سطح مقطع مجرای ورودی روبه افزایش است به طوریکهشکل شیپوره رابه خودگرفته است. درصورتیکه جهت چرخش پروانه عکس حرکت عقربه های ساعت باشد درهنگام چرخش پروانه سیال بلافاصله از سمت چپ پروانه خارج شده و پس از زبان، وارد شیپوره می شود. این روند ادامه دارد که به موجب آن سیال بیشترو بیشتری درحدفاصله پروانه و پوسته شیپوره جمع می شود و سپس از پوسته خارج می شود. در عبور از این مسیر بخش عمده ای از انرژی جنبشی سیال به لحاظ ورود به سطح مقطع وسیعتر به انرژی پتانسیل (فشار) تبدیل می شود.

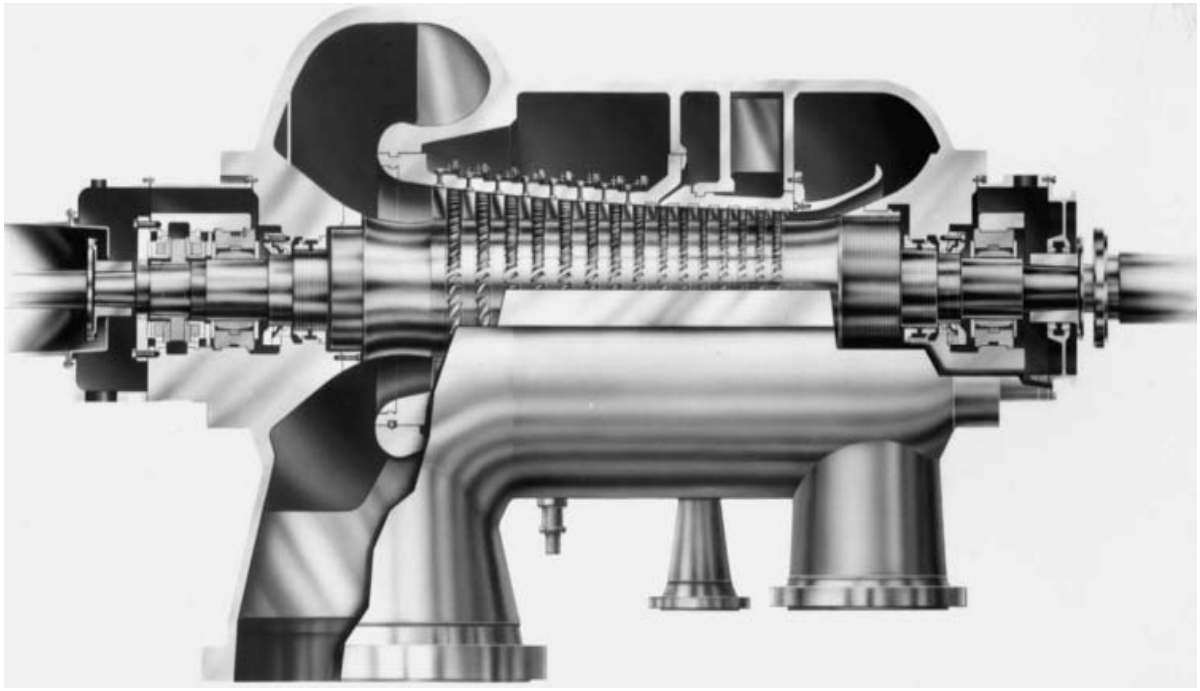
کمپرسورهای دوار با جریان محوریAxial flow compressor:

حرکت در امتداد یک محور را حرکت محوری(Axial Movement) می گویند.

کمپرسوری که جریان گاز را بموازات محورحرکت دهد کمپرسور جریان محوری (Axial Movement Compressor) می گویند .به عبارتی دیگر چون هوا در جهت محور کمپرسور حرکت می کند به این نام معروف شده این کمپرسور دارای تعدادی تیغه ثابت (Stator Blade) و تعدادی تیغه متحرک(Rotor Blades) است. تیغه های ثابت درون بدنه قرار گرفته اند و تیغه های متحرک روی محور قرار گرفته اند و همراه محور می چرخد. ترتیب قرارگرفتن تیغه ها بدین صورت می باشد که یک ردیف تیغه متحرک دربین دوردیف تیغه های ثابت قراردارد . ضمن اینکه هیچگونه تماسی بایکدیگر ندارند.

http://www.mohandes-iran.com



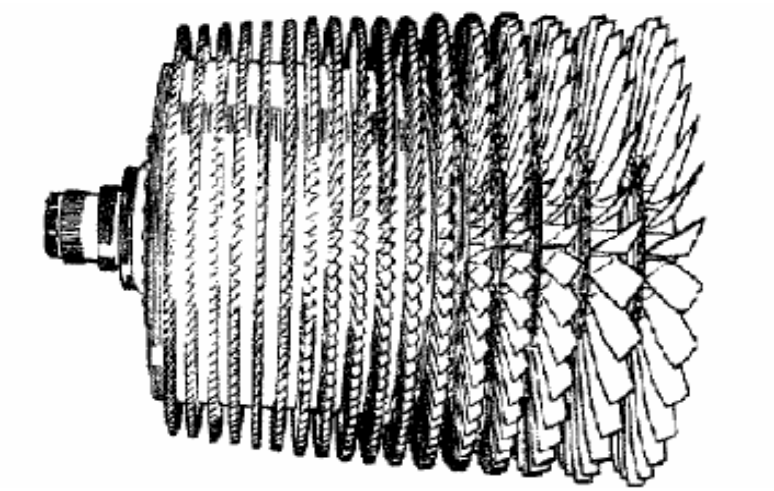


نمونه هایی از کمپرسور جریان محوری

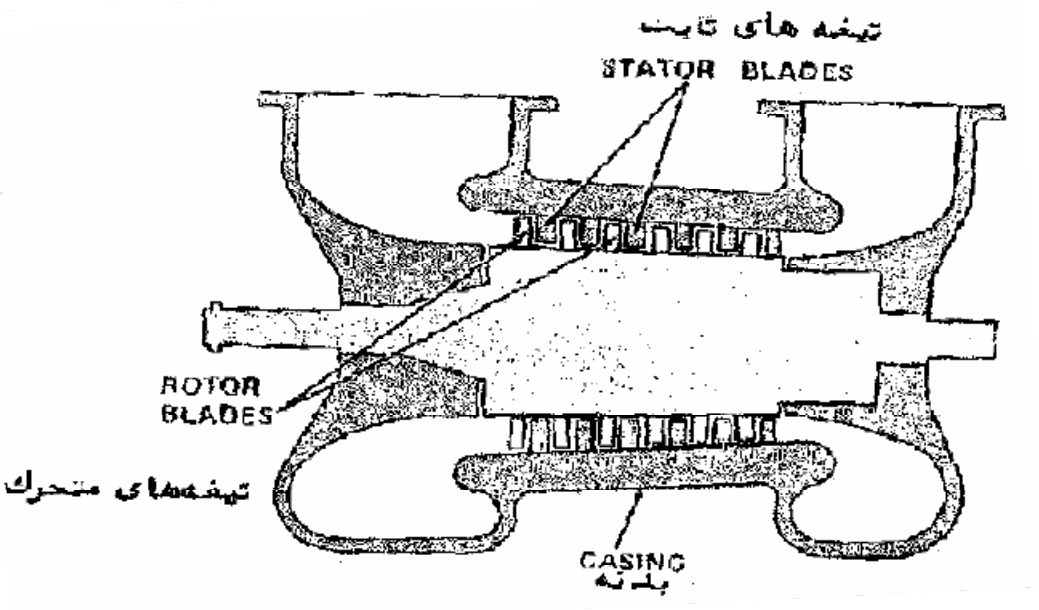
تیغه های متحرک همانند پره های پنکه عمل می کنند وباعث افزایش فشار وسرعت هوا می گردند دراثربرخورد هوا با تیغه های ثابت هوا ازبین فاصله تیغه که همانند پخش کننده عمل می کنند عبورکرده ودرنتیجه کم شدن سرعت وافزایش فشارهواراحاصل می نمایند

http://www.mohandes-iran.com

پس ازافزایش فشاردراین کمپرسورها بدین صورت است که هوا را بتدریج به فضای تنگ تری می رانند ودرنتیجه کم شدن حجم، فشارهوا بالا می رود .



محور کمپرسور هوای توربین Rolles – Royce
شامل هفده ردیف تیغهٔ متحرک



http://www.mohandes-iran.com

پس بنابراین میتوان نتیجه گرفت این نوع از کمپرسورها از دو قسمت عمده تشکیل شده اند:

۱. تیغه های ثابت : Stator Blades

۲. تیغه های متحرک : Rotor Blades

در حین چرخش کمپرسور به وسیله استارتر سرعت هوا بوسیله تیغه های متحرک زیاد شده و سپس سرعت زیاد شدهٔ هوا بوسیله تیغه های ثابت ضمن هدایت به فشار تبدیل می گردد و طول تیغه ها به مراتب در هر مرحله کوتاهتر شده و هوا فشرده تر می گردد و هر مرحله شامل یک ردیف تیغه متحرک و یک ردیف تیغه ثابت است که تعداد این مراحل " Stage " در توربین رستون T.A ، ۱۳ مرحله می باشد . این دستگاه با توربین کمپرسورتوسط یک اتصال قابل خمش "Flexible Coupling " متصل شده و روی یک محور قرار دارد که قطعات متعلقه در شکل بالا مشخص می باشد. ضمناً برای تعمیر و تمیز کردن و پیاده و سوار کردن آن ابزارهای مخصوص و دقت زیادی لازم است و برای شستن و تمیز کردن تیغه ها حتماً از مواد پاک کننده مانند گازوئیل و برس موئی و نفت و پارچه های نرم استفاده کرد.در جریان تراکم, هوا از یک سری طبقات (stages)عبور می نماید هر طبقه شامل یک ردیف پرهای متحرک (moving blades)متصل به دیسک و نیز ردیفی از پرهای ساکن(stationary blades)

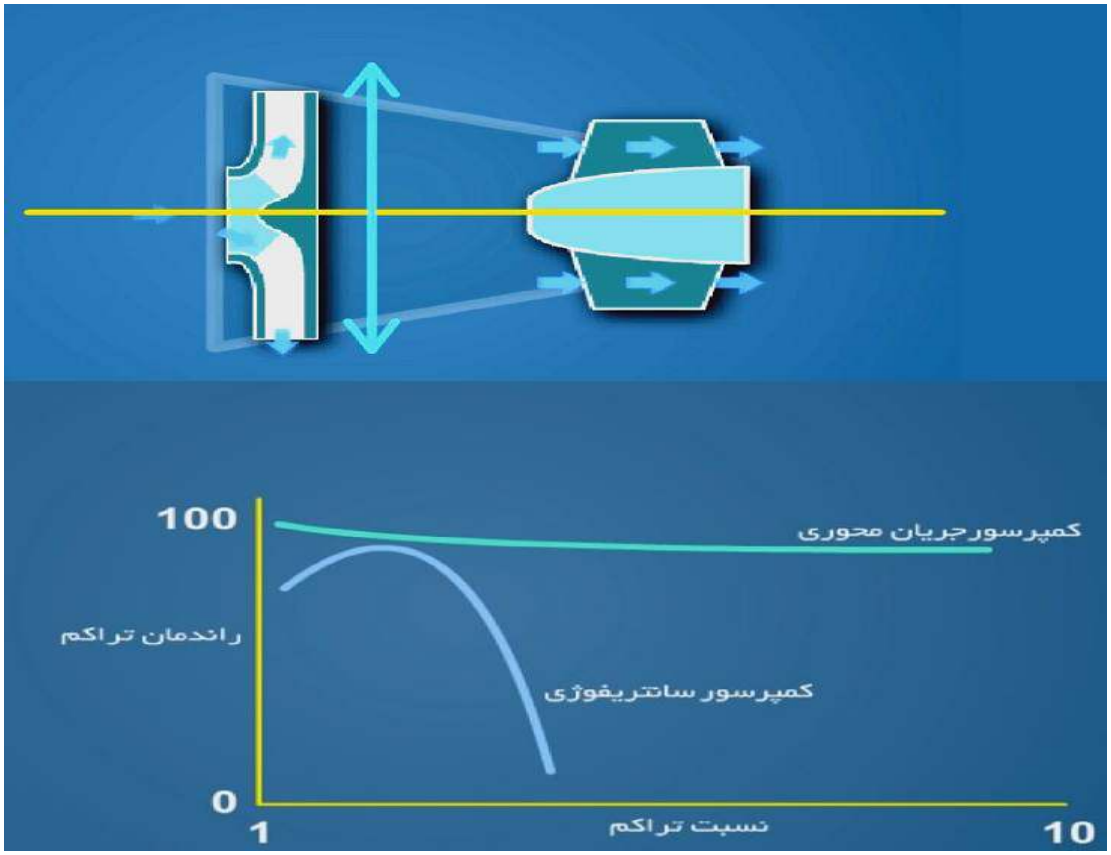
متصل به پوسته میباشد هر دیسک و پرهای متصل به آن یک چرخ کمپرسور نام دارد این چرخ ها که در کنار هم بر روی محور سوار شده اند با هم روتور کمپرسور را تشکیل میدهند

(rotor compressor)کلیه پرهای ثابت و متحرک و پوسته ای که بدان متصل است استاتورکمپرسور را تشکیل میدهد(stator compressor) تعداد طبقات در کمپرسور محوری جهت رسیدن به فشار مورد نیاز زیاد میباشد افزایش سرعت هوا در عبور از تیغه های روتر و کاهش سرعت آن در تیغه های استاتور تقریبا با هم مساوی بوده و همدیگر را خنثی میکنند

http://www.mohandes-iran.com

استاتور هوای ورودی را منظم و آن را تحت زاویه ای منظم به سمت پرهای متحرک بعدی هدایت میکند مسیر عبور هوا در کمپرسور محوری مرتب باریکتر میشود و این موضوع برای ثابت نگه داشتن سرعت هوایی که مرتبا غلیظتر میشود ضروری است زاویه پرها از ریشه تا نوک افزایش می یابد

- کمپرسور جریان گریز از مرکز از نظر ساختمان ارزلنتر از کمپرسور جریان محوری تمام میشود
- بازده کمپرسورهای جریان محوری معمولا بیشتر از کمپرسور های گریز از مرکز است
- کمپرسور محوری در مقایسه با نوع دیگر برای یک خروجی معین دارای قطر کوچکتر و طول بلند تر است در صورتی که کمپرسور گریز از مرکز قطر بزرگتر و طول کوتاه تر است
- کمپرسور گریز از مرکز تحت شرایط کاری نامناسب تحمل بیشتری را دارا می باشد(برای کار خشن تر مناسب تر است)



http://www.mohandes-iran.com

ویژگی های کمپرسور هوا:

ویژگیهای مهم کارکرد در کمپرسور عبارت است از:

- نسبت تراکم (V_2/V_1)
- دبی جریان هوا (Q)
- سرعت چرخشی موتور (RPM)
- درجه حرارت هوای ورودی (T_1)
- فشارهوای ورودی (P_1)

- سرعت چرخشی موتوریک دستگاه نسبتا نو دارای توانایی های فیزیکی معینی است که معمولا شاخص بهترین وضعیت طراحی آن توربین است.
- درجه حرارت وفشارهوای ورودی نقش مهمی دروضعیت کارکردی نهایی کمپرسور دارند.
- برای ارزیابی وضعیت کمپرسوردرشرایط عملیاتی مختلف انتخاب یک مأخذ معین ضروری است .
- تشریح وضعیت کلی عملیاتی کمپرسور نیازمند محاسبات عددی یا منحنی های خاص است.
- در ارزیابی شرایط عملیاتی مختلف کمپرسور پس ازانجام محاسبات و تبدیل آن به شرایط معادل شرایط استاندارد ماخذ (که به آن نرخ جریان معادل ، سرعت معادل) گفته می شود ازمنحنی هایی موسوم به منحنی کارکرد کمپرسور (Performance Curve) استفاده می شود.

سرج (Surging) در کمپرسور:

زمانیکه کمپرسور هوا را بطرف سیستم می فرستد، اگر سیستم پر باشد ، احتیاج سیستم به حجم هوا کمتر می شود و چنانچه دراین شرایط مصرف کننده ها به اندازه هوای تحویلی کمپرسورمصرف نداشته باشند باعث می شود که فشارسیستم بالابرود و درنتیجه افزایش فشارمقاومت خروجی کمپرسور زیاد می گردد. این امرخود باعث کم شدن ظرفیت کمپرسورمی شود .اگرهمچنان ازهوا استفاده شود فشار در سیستم آنقدرافزایش پیدا می کند تاحدی که فشارش بیشترازتوان کمپرسورگردد.

http://www.mohandes-iran.com

دراین حالت است که جریان هوا متوقف می شود وچون فشار سیستم بیشتر از فشارکمپرسورمی گردد این امر باعث می شود که جریان هوا ازدرون سیستم بطرف کمپرسور برگردد .بعد از مدتی که مقداری ازفشارهوا به طرف کمپرسور برگشت و یا اینکه درون سیستم مصرف شدو فشارسیستم ازماکزیمم فشار کمپرسور کمترگردید کمپرسورمجددا شروع به فشرده کردن هوا بداخل سیستم می کند.اگراستفاده ازسیستم هنوز بمقدارکم ادامه داشته باشد کمپرسوردوباره بازمی ایستد. این رفت وبرگشت سریع هوا به کمپرسورراموج زدن یا سرج می نامند.

اگرعمل سرج ادامه داشته باشد باعث ایجاد مشکلات زیر می شود:

- لرزش شدید
- خرابی یاتاقان ها
- خرابی نشت بندها
- خرابی محور
- خرابی فاندیشین (foundation)
- برای جلوگیری از سرج در کمپرسور از اجزای زیر استفاده می شود:
- استفاده ازشیرهای تخلیه(Bleed Valve)
- تیغه های متغییر در ورودی کمپرسور(Inlet Guide Valve)

در این حالت با استفاده ار این شیرهای مخصوص مقداری از هوای وارد شده به کمپرسور در زمان راه اندازی و توقف از مراحل مختبف کمپرسور به بیرون هدایت میگردد به این ترتیب سرعت سریال کنترل میشود.محل قرارگیری این شیرها در مراحل کمپرسور بستگی به کمپرسور دارد و عموما در مراحل فشار بالا (HP) ،فشار متوسط(IP) و فشار پایین (LP) وجود دارند به عنوان مثال ممکن است از این شیرها در کمپرسورهای محوری بزرگ که شانزده مرحله دارند در مرحله چهارم و دهم استفاده گردد.این شیرها در زمان راه اندازی و تا رسیدن به حدود ۹۵ درصد دور و در زمان توقف از ۹۵ درصد دور به پایین باز

http://www.mohandes-iran.com

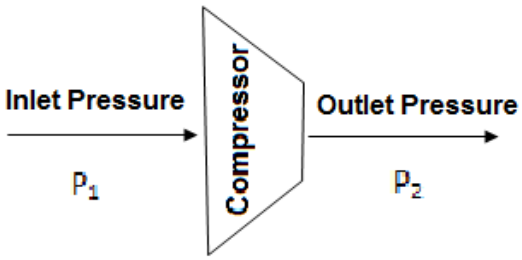
بوده و هوای کمپرسور را به بیرون از کمپرسور و عموما به بعد از توربین و در مسیر هوای عبوری از توربین گاز هدایت میکنند این شیرها توسط سامانه کنترل باز و بسته میشود.

همانطور که قبلا هم گفته شد در کنار هر ردیف پرهای ثابت یک ردیف پرهای متحرک وجود دارد به مجموع یک ردیف پرهای ثابت و یک ردیف پرهای متحرک یک مرحله کمپرسور می گویند تعداد این مراحل با توجه به مقدار هوا و فشار نهایی مورد نیاز توربین تعیین میشود عموما بیشتر کمپرسورهای امروزی دارای ۸ تا ۱۶ مرحله می باشند در هر مرحله همزمان با ایجاد فشار در گاز، از طرف گاز نیز بر پره ها و به عبارتی بر شفت کمپرسور نیرو وارد خواهد شد در بعضی از کمپرسورهای محوری یک یا چند ردیف پره های ثابت با زاویه متغیر وجود دارد که اصطلاحا(NGV)(Nozzle Guide vane) نامیده میشوند این پره ها در هنگام عملیات عادی با تغییر زاویه، میزان هوای ورودی به توربین را جهت ثابت نگاه داشتن دما کنترل مینماید. تغییرات دما در محفظه احتراق به دلایل زیادی از جمله تغییر ارزش حرارتی سوخت،تغییر دمای محیط، تغییر میزان بار و... میتواند اتفاق بیافتد همچنین با شدن این پره ها در حین راه اندازی توربین گاز و همزمان با بالا رفتن دور سبب افزایش مقدار هوای ورودی به درون کمپرسور می شود در کمپرسورها علاوه بر پره ها با زاویه حمله متغییر از بلید ولوها یا بلو آف ولوها نیز برای جلوگیری از بروز پدیدهای سرج و استهال بهره برده می شود در مرحله راه اندازی توربین گاز هنوز پره های توربین به دمای ثابت نرسیده اند و با گرمای گازهای حاصل از احتراق در حال گرم شدن می باشند از این رو دمای گازهای حاصل از احتراق در حال عبور از مراحل مختلف توربین به شدت پایین می آید بر اثر پایین آمدن دما دانسیته گاز نیز زیاد می شود از اینرو در بین مراحل توربین تجمع گاز بوجود می آید در این حالت جریانهای بعدی گاز با مسیری که در آن مقداری گاز تجمع کرده روبرو میگردند این امر باعث بالا رفتن فشار شده و بدین ترتیب تمامی هوای خروجی از کمپرسور نمی تولنند از توربین عبور کنند و ممکن است بخشی از گاز به طرف کمپرسور برگردند و پدیده سرج اتفاق بیفتد.

http://www.mohandes-iran.com

تبدیل انرژی در کمپرسور هوا:

کمپرسور هوا دو بخش متمایز فشاری هوا را ازهم جدا می کند.در یک سمت فشار ورودی(که معمولا فشار هوا است) قراردارد و درسمت دیگر در نتیجه کارکرد کمپرسور، فشار بیشتر است. به محض ورود هوا به داخل کمپرسورانرژی ازطریق چرخش تیغه های موجود روی دیسک کمپرسور به هوا منتقل می شود .مشخصه فیزیکی کمپرسور، نرخ جریان هوا ، نسبت تراکم و راندمان آنرا تعیین می کند و این عوامل مقداری انرژی راکه کمپرسورمی تواند به هوا منتقل کند تعیین می کند .میزان انرژی منتقل شده به هوا در کمپرسور از رابطه زیر محاسبه می شود:



$$\Delta h = C_p \Delta T$$

Δh← تغییر آنتالپی بر حسب $BTU/\ lb_m$

C_P ← گرمای ویژه در فشار ثابت بر حسب $BTU/\ lb_m\ °F$

ΔT ←تغییر دما بر حسب درجه فارنهایت (°F)

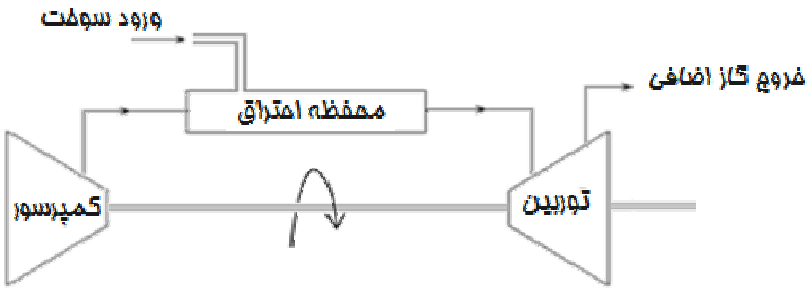
رابطه بین درجه سانتی گراد و فارنهایت به صورت روبرو است: $T(°F)=1.8\times T(°C)+32$

بعنوان مثال: اکثرتغییرات درجه حرارت هوا درحین فشارافزایی کمپرسور یک توربین برابر با ۶۰۰°F است. میزان تغییرانرژی هوادرمسیرعبورازکمپرسورچقدراست؟(برای هوا $C_P=0.24\ BTU/\ lb_m\ °F$)

$$\Delta h = C_p \Delta T \rightarrow \Delta h = 0.24 \times 600 = 144\ BTU\ /\ lb_m$$

http://www.mohandes-iran.com

محفظه احتراق(Combustion Chamber-Combustor):

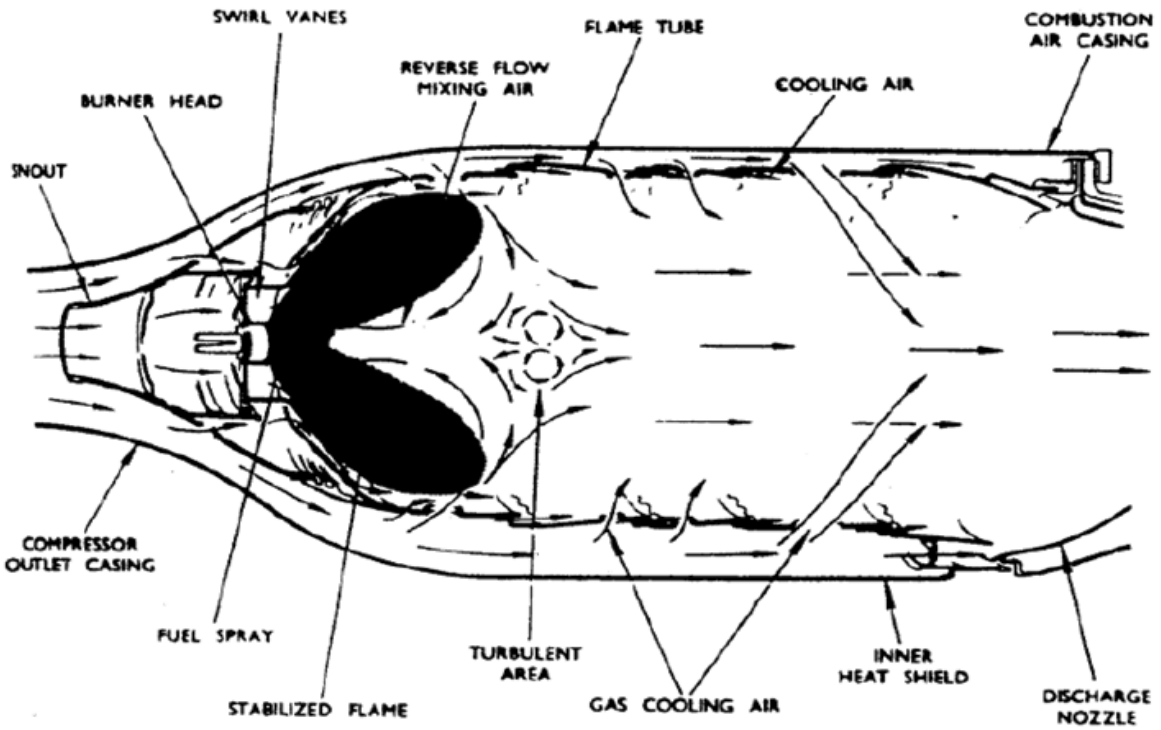


اگر بعد از افزایش فشار هوا بوسیله کمپرسور هوا مستقیما وارد توربین شود (توربینی که کمپرسور را می چرخاند) وهیچ انرژی دراین میان ازبین نرود با فرض ناچیز بودن اتلاف انرژی ، انرژی حاصل شده درمحورخروجی توربین معادل انرژی مورد نیاز برای چرخش کمپرسور خواهد بود و هیچ توان اضافی درخروجی محور توربین باقی نمی ماند. پس کاری صورت نگرفته است و انرژی منتقل شده توسط استارتر به هدر رفته است. لذا می بایست کاری کرد که انتالپی هوای خروجی کمپرسور را به مقدارزیاد افزایش داد که این افزایش آنتالپی با استفاده از سوختن سوخت در یک محفظه احتراق صورت می گیرد در شکل صفحه بعد بعد، یک محفظه احتراق در توربین Rolls-Royce به صورت شماتیک نشان داده شده است.هوای فشرده شده توسط کمپرسور از طریق کانال جریان هوا " Cross Over Duct " وارد محفظه احتراق می شود قسمتی از این نیرو صرف چرخاندن خود کمپرسور و اصطحکاک میشود و لذا برای جبران نیروی حدر رفته باید حجم هوای خروجی کمپرسور زیاد شود تا انرژی کافی بدست آید این عمل در محفظهٔ احتراق از سوختن گاز طبیعی در مجاورت هوای فشرده انجام می گیرد بر اثر انبساط گاز حجم هوا بدون تغییر فشار زیاد شده و به انرژی جنبشی افزوده می شود که نیروی عظیمی برای چرخاندن توربین می باشد ساختمان محفظه احتراق از دو لایه ساخته شده است :

۱-لایه بیرونی که جنس آن آلیاژی است از چدن

http://www.mohandes-iran.com

۲- لایه درونی " Flame Tube " در مقابل حرارت مقاوم است . آلیاژی است از کروم و نیکل بنام نیمونیک هوائی که از کمپرسور وارد محفظه احتراق می گردد به دو قسمت عمده هوای اولیه " Primary air " و هوای ثانویه " Secondary air " تقسیم می شود . هوای اولیه مقدارش ۳۰٪ می باشد که ضمن جریان بین آتش " لایه درونی " و بدنه " لایه بیرونی " مانع گرم شدن پوسته بیرونی شده و از راه سوراخهای نزدیک مشعل یا سوخت مخلوط شده و مشعل را روشن نگاه می دارد ضمناً جهت شعله در وسط محفظهٔ احتراق تنظیم می شود ، قسمت دیگر که مقدارش ۷۰٪ می باشد " Secondary air "از راه سوراخهای پوسته درونی " Flame Tube " وارد آن شده و با هوای اولیه مخلوط می گردد برای روشن کردن مشعل اصلی " main Burner " از مشعل راهنما " شمع جرقه زنی " ، " gas ignitor " استفاده می شود محفظهٔ احتراق در شکلهای مختلفی در انواع توربین ها ساخته است که از انواع آن می توان حلقه ای ، جریان معکوس ، قوطی شکل و زانوئی را نام برد که در توربین رستونی T.A محفظه احتراق از نوع زانوئی می باشد.



محفظه احتراق – توربین Rolls - Royce

http://www.mohandes-iran.com

محفظه احتراق شامل قسمتهای زیر است:

۱) لوله شعلهFlame tube

۲) لوله عبور هوا Air casing

۳) تعدادی سوخت پاش Fuel

۴) احتراق یا آتش زنه Ignited

نکات مهم طراحی سیستم احتراق در توربین گازی:

به جز در بعضی کاربردهای خاص فضای احتراق نسبتا کوچک طراحی می شود. توزیع حرارت هوای خروجی ازمحفظه احتراق تاحدامکان یکدست است تاکارایی خوبی داشته باشد. جهت جلوگیری از ایجاد حرارت اضافی، نقطه داغ احتراق(Hot Spot) می بایستی مستمر (Continuous) و پایدار(Stable) باشد. اگرفرآیند احتراق کامل نباشد، موجب تشکیل ذرات کربنی شده که به لحاظ سرعت بالای این ذرات سایش وکندگی تیغه توربین کاهش عمرمفید تیغه ها وتوربین رابدنبال دارد . در محفظه احتراق، فشار و دما بسیار بالا است و خستگی(Fatigue) مصالح نیز وجود دارد.این نکات می بایست در انتخاب مواد و طراحی صالح در نظر گرفته شود.

توزیع هوای ورودی در محفظه احتراق :

۱۵ تا ٪ ۲۰ هوای ورودی از تیغه های شکل دهنده جریان عبورمی کند. عبورهوا ازاین بخش موجب افشان شدن کامل سوخت (که معمولا با قطرات سوخت همراه است) می شود. نتیجه آن اختلاط کامل سوخت و هوا و نیزاحتراق آن دردرجه حرارت بالا در بخش اول محفظه احتراق است. حدود ٪ ۳۰ هوا از مجاری خاص به بخش دوم محفظه احتراق هدایت می شود تا عمل سوختن کامل شود. بقیه هوا در بخش سوم محفظه احتراق برای همگن کردن محصول احتراق و نیز خنک کردن محفظه احتراق مصرف می شود. دراین بخش همگن کردن محصول احتراق درمسیرعبوری خود درحدی باید صورت گیرد که

http://www.mohandes-iran.com

ازایجاد سایر نقطه های داغ (Hot Spot) در محفظه احتراق جلوگیری کند.تعداد محفظه احتراق بستگی به طراحی ساخت وقدرت مورد نیازمی باشد که ممکن است توربین دارای یک محفظه احتراق یاچندین محفظه احتراق مجزا باشد .

محاسبه گرمای سوختن:

ارزش حرارتی(Heating Value) عبارتست از میزان گرمایی که از سوختن واحد جرم و یا واحد حجم سوخت، تولید می شود.ارزش حرارتی، دارای واحد های BTU/lb_m ، MJ/kg ، BTU/gal ،MJ/lit و ... است .

جهت محاسبه آنتالپی در فرآیند سوختن کامل :یا به عبارتی دیگرمیزان تغییرانتالپی هوادراتاق احتراق ازرابطه ذیل محاسبه می شود،

$$\Delta h = \dot{m} \times H.V$$

به عنوان مثال: می خواهیم یک توربین گازی طراحی کنیم که در آن، میزان گرمای تولیدی برابر با 10^5 BTU/hr است. در صورتی که سوخت این توربین متان باشد، دبی جرمی مورد نیاز آن را تعیین کنید.

$$\Delta h = \dot{m} \times H.V \rightarrow 10^5\, BTU/hr = \dot{m}(lbm/hr) \times 23{,}900(BTU/lbm)$$

$$\rightarrow \dot{m} = 41.84 lbm/hr$$

بنابراین موتورتوربین گازی وسیله ای است که نهایتًا انرژی شیمیایی سوخت رابه انرژی مکانیکی قابل استفاده تبدیل می کند. کمپرسور انرژی راازچرخش محورخود به انتالپی هوا تبدیل می کند.

محفظه احتراق تسهیلات لازم را برای ترخیص انرژی شیمیایی از سوخت فراهم می کند و موجب افزایش انتالپی هوا دراتاق احتراق می شود ونهایتًا توربین انرژی جنبشی وانتالپی را از سوخت محترق شده بازیافت می کند وانرژی بیش ازنیازمندی چرخش کمپرسور را تولید می کند.

http://www.mohandes-iran.com

انرژی باقی مانده درشافت خروجی معمو ً لا بین ۲۰ تا ۴۰ درصد انرژی شمیایی سوخت مصرفی است

در حقیقت وظیفه اصلی یک اطاق احتراق دریافت هوای فشرده شده از خروجی کمپرسور انجام عمل احتراق کامل روی سوختهای وارد شده به آن به شکل مداوم است

در جدول زیر، ارزش حرارتی برخی از سوخت ها بیان شده است.

Fuel type	MJ/l	MJ/kg	BTU/imp gal	BTU/US gal	BTU/lbm
Regular gasoline/petrol	34.8	47	150,100	125,000	-
Premium gasoline/petrol	-	46	-	-	-
Autogas (LPG) (60% propane and 40% butane)	25.5-28.7	51	-	-	-
Ethanol	23.5	31.1	101,600	84,600	-
Methanol	17.9	19.9	77,600	64,600	-
Gasohol (10% ethanol and 90% gasoline)	23.7	45	145,200	121,000	-
E85 (85% ethanol and 15% gasoline)	33.1	44	142,750	118,950	-
Diesel	38.6	48	166,600	138,700	-
BioDiesel	35.1	39.9	151,600	126,200	-
Vegetable oil (using 9.00 kcal/g)	34.3	37.7	147,894	123,143	-
Aviation gasoline	33.5	46.8	144,400	120,200	-
Jet fuel, naphtha	35.5	46.6	153,100	127,500	-
Jet fuel, kerosene	37.6	47	162,100	135,000	-
Liquefied natural gas	25.3	55	109,000	90,800	-
Methane	-	-	-	-	23,900
Gas Oil	-	-	-	-	19,400
Liquid hydrogen	9.3	130	40,467	33,696	-

1 US gal=3.785 liters
1 imp gal=4.545 liters

.1 lbm=453.59 gr
.1 BTU= 1055.056 J

.1 cal= 4.184 J

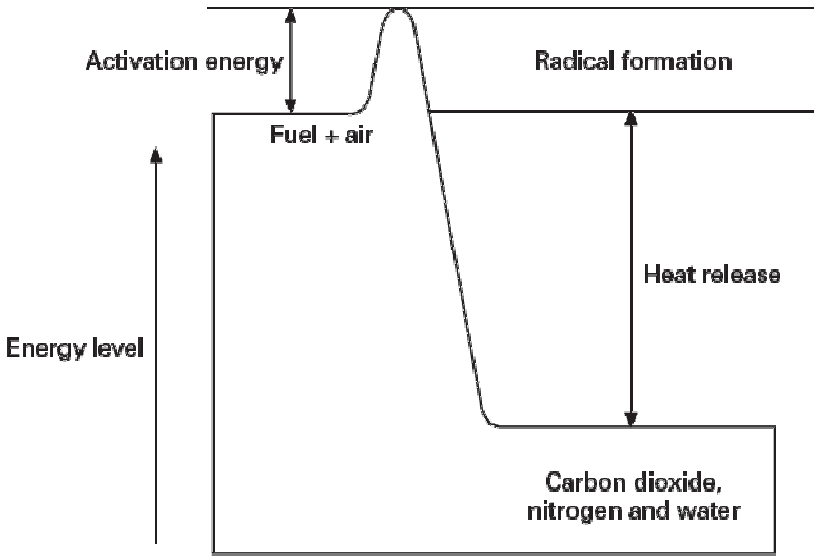
http://www.mohandes-iran.com

سوختن در محفظه احتراق:

هدف ازاحتراق گاز در هوا، افزودن انرژی حرارتی درهوا بوسیله افزودن درجه حرارت آن است.دراتاق احتراق انرژی شیمیایی سوخت(Fuel) موجب افزایش آنتالپی هوا می شود.در ادامه به بررسی فرآیند احتراق می پردازیم.در شرایط اتمسفری، سوخت های هیدروکربنی به آرامی می سوزند.

انرژی فعال سازی(Activation Energy):

جهت سوزاندن سوخت های هیدروکربنی، می بایست دمای سوخت به اندازه کافی افزایش یابد.زمانی که دما به اندازه کافی افزایش یافت، مولکول های اولیه به اجزایی به نام رادیکال(radical) شکسته می شوند.انرژی لازم جهت تشکیل رادیکال های آزاد از سوخت اولیه، انرژی فعال سازی نامیده می شود.به طور کلی در شرایط جوی این رادیکال ها، ناپایدار بوده و در صورت عدم وجود اکسیژن به حالت اولیه باز می گردند.



Main process in the combustion of hydrocarbon fuels.

http://www.mohandes-iran.com

استوکیومتری سوختن:

یک مول هوا دارای اجزای زیر است:

- یک مول اکسیژن(O_2)
- ۷۶/۳ مول نیتروژن(N_2)
- مقادیر جزیی از گازهای دیگر مانند دی اکسید کربن(CO_2) و آرگن(Ar)

همانطور که قبلا بیان شد، یک سوخت هیدروکربنی را می توان بر اساس نسبت کربن به هیدروژن آن بیان کرد.واکنش استوکیومتری سوختن به صورت زیر است:

$$C_xH_y + ms(O_2 + 3.76N_2) = xCO_2 + (y/2)\ H_2O + 3.76\ ms\ N_2$$

or

$$C_xH_y + msO_2 = xCO_2 + (y/2)H_2O$$

که در آن ms، تعداد مول مورد نیاز برای سوختن کامل است.اگر موازنه مولی در مورد اکسیژن را بنویسیم، رابطه ms با xو y عبارتست از:

$$ms = x + y/4$$

نسبت جرمی سوخت-هوا بر اساس روابط استوکیومتری $(FAR)_s$ به صورت زیر است:

$$(FAR)_s = \frac{12.01x + 1.008y}{ms(32 + 3.76 \times 28.013)}$$

که در آن،12.01 جرم مولکولی کربن،1.008 جرم مولکولی هیدروژن، 32 جرم مولکولی اکسیژن و 28.013 جرم ملکولی نیتروژن است اگر مقدار ms را در رابطه فوق جایگزین کنیم خواهیم داشت:

http://www.mohandes-iran.com

$$(FAR)_s = \frac{12.01x + 1.008y}{137.33\left(x + \frac{y}{4}\right)}$$

این رابطه، میزان نسبت جرمی سوخت به هوا را در یک فرآیند احتراق کامل مشخص می کند. به عنوان مثال، اگر بخواهیم متان(CH_4,x=1,y=4) را در هوا بسوزانیم، نسبت استوکیومتری سوخت-هوا برابر با 0.0584 است.بنابراین 17.2 kg (1/0.0584=17.2) هوا جهت سوزاندن 1 kg متان لازم است.اگر بخواهیم نفت سفید(kerosene) که دارای فرمول $C_{12}H_{24}$ ($C_{12}H_{24}$,x=1,y=4) است را بسوزانیم، نسبت استوکیومتری سوخت-هوا برابر با 0.068 است که به 14.71 kg هوا جهت سوزاندن 1 kg آن لازم است.

در ادامه به بررسی فرآیند سوختن در صورت وجود مقدار اضافی هوا می پردازیم.

سوختن ناقص: بر خلاف فرآیند سوختن کامل، فرآیند سوختن ناقص فرآیندی است که در آن مقداری اکسیژن در بخش فرآورده ها باقی می ماند .

اغلب به این فرایند، فرایند سوختن در هوای اضافی(Combustion in excess air) نیز گفته می شود. موازنه مولی فرآیند سوختن ناقص به صورت زیر است:

$$C_xH_y + m(O_2 + 3.76N_2) = xCO_2 + (y/2)H_2O + (m - x - y/4)O_2 + 3.76N_2$$

که در آن m مقدار هوای ورودی در سوختن ناقص(مقدار هوای اضافی) است که بخشی از اکسیژن آن باقی مانده و مصرف نمی شود. FAR در این فرآیند به صورت زیر تعریف می شود:

$$FAR = \frac{12.01x + 1.008y}{137.33m}$$

http://www.mohandes-iran.com

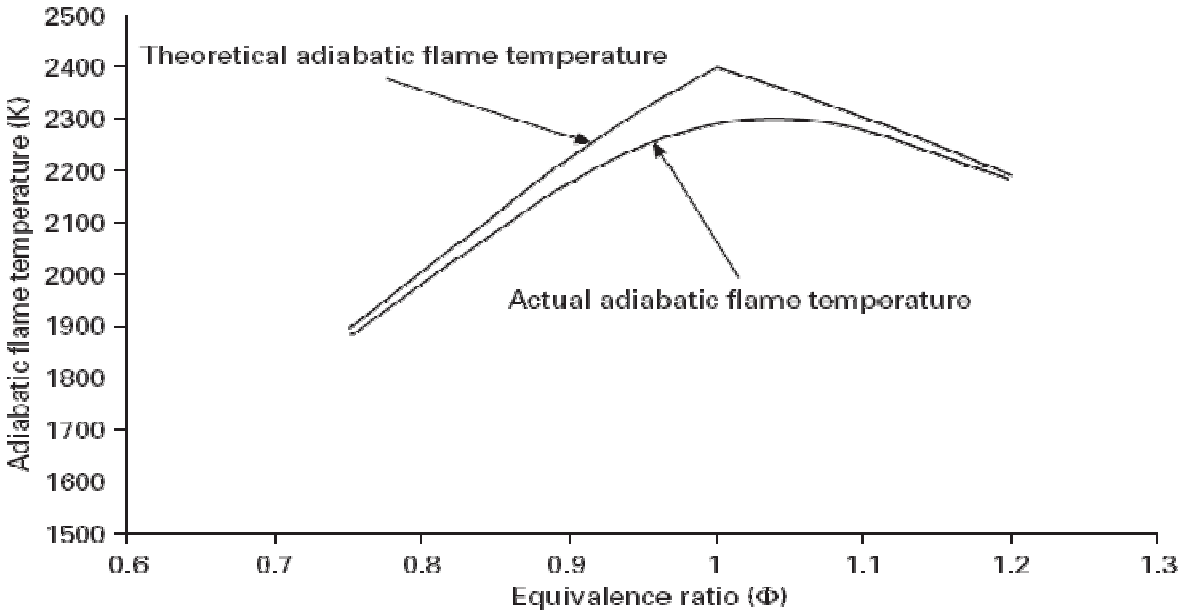
دمای آدیاباتیک شعله(Adiabatic flame temperature):

هدف از سوزاندن سوخت در یک محفظه احتراق، افزایش دمای جریان گاز است. بنابراین، دمای شعله(flame temperature)، به دلیل تاثیری که روی سرعت انجام فرآیند سوختن دارد، یکی از فاکتورهای مهم است.یکی دیگر از پارامترهایی که روی سرعت واکنش تاثیر دارد، فشار است. در صورت نبود هیچ گونه انتقال حرارت به خارج (Q=0)، دمایی که به هنگام سوختن شعله ایجاد می شود، دمای آدیاباتیک شعله نامیده می شود. در عمل، در فرآیند سوختن، مقداری گرما به بیرون منتقل می شود (Q≠0)، و دمایی که ایجاد می شود، کمتر از دمای آدیاباتیک شعله است. در دمای شعله بالاتر از 1800K، ممکن است محصولات فرآیند احتراق تفکیک شده و به رادیکال تبدیل شوند.این فرآیند تفکیک خود گرماگیر(endothermic) است و دمای شعله را کاهش می دهد. جهت مقایسه دمای شعله سوخت های مختلف، اغلب نسبت تعادل به کار می رود .نسبت تعادل که با Ø نشان داده می شود، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\phi = \frac{FAR}{(FAR)_s} = \frac{m}{ms}$$

برای سوخت های با ارزش حرارتی پایین(lean)، Ø کمتر از یک است.برای سوخت های غنی(reach) Ø بالاتر از یک است.در صورتی که FAR به نسبت استوکیومتری باشد، Ø یک است. شکل زیر، دمای آدیاباتیک شعله را برای متان، در مقابل Ø نشان می دهد. در شکل زیر، میزان انحراف از دمای آدیاباتیک واقعی شعله نیز مشاهده می شود. بالاترین دمای آدیاباتیک شعله نیز در سوخت های نسبتا غنی (Ø=1.05) روی می دهد. در صورت وجود کربن بیشتر در سوخت،دمای آدیاباتیک شعله و Ø مقدار بیشتری خواهد داشت.

http://www.mohandes-iran.com



Effect of equivalence ratio on adiabatic flame temperature for CH_4.

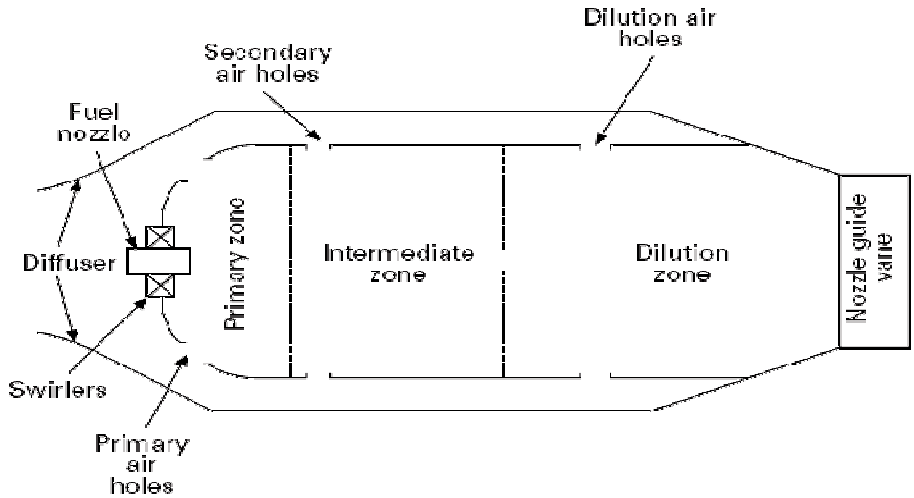
سیستم احتراقی توربین گازی(Gas turbine combustion system)

سیستم احتراقی توربین گازی، دارای بخش ها و اجزای زیر است:

افشاننده (diffuser)　　ناحیه اصلی (primary zone)

ناحیه رقیق سازی (dilution zone)　　ناحیه میانی (intermediate zone)

نازل سوخت (fuel nozzle)

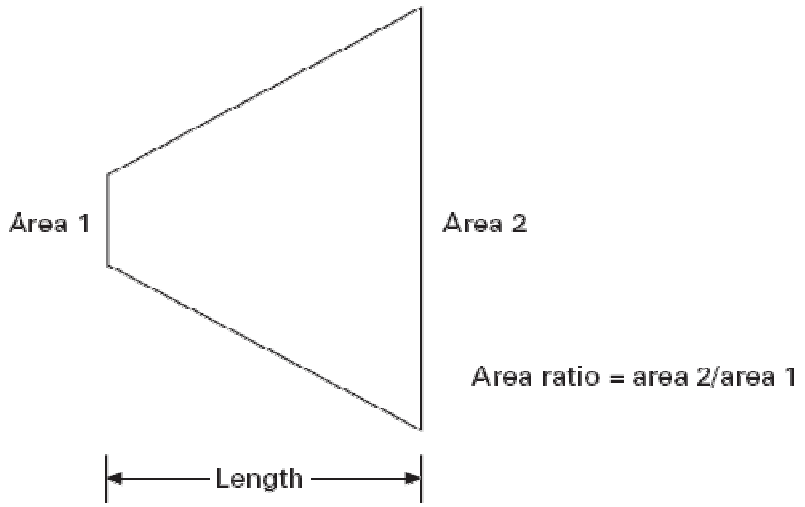


Schematic representation of a typical combustion chamber.

http://www.mohandes-iran.com

افشاننده (diffuser) :

وظیفه افشاننده، کاهش سرعت جریان است، به گونه ای که به آغاز فرآیند احتراق کمک کند. سوخت در هوای خروجی کمپرسور که دارای سرعت 200m/s سوزانده می شود.علاوه بر اینکه سوختن در چنین شرایطی مشکلاتی را به همراه دارد، فشار خروجی در محفظه احتراق نیز مقداری پایین خواهد بود، که این امر موجب کاهش عملکرد مناسب توربین می شود. سرعت گاز خروجی از کمپرسور باید کاهش یابد و این کار توسط افشاننده صورت می گیرد. همانطور که در شکل زیر دیده می شود،یک افشاننده ساده دارای ساختاری واگرا با دیواره ی صاف و تخت است. هنگامی که سیال در افشاننده حرکت می کند، از سرعت آن کاسته می شود و به فشار استاتیک آن اضافه می شود.معمولا در افشاننده، سرعت به 1/5 سرعت اولیه کاهش می یابد.

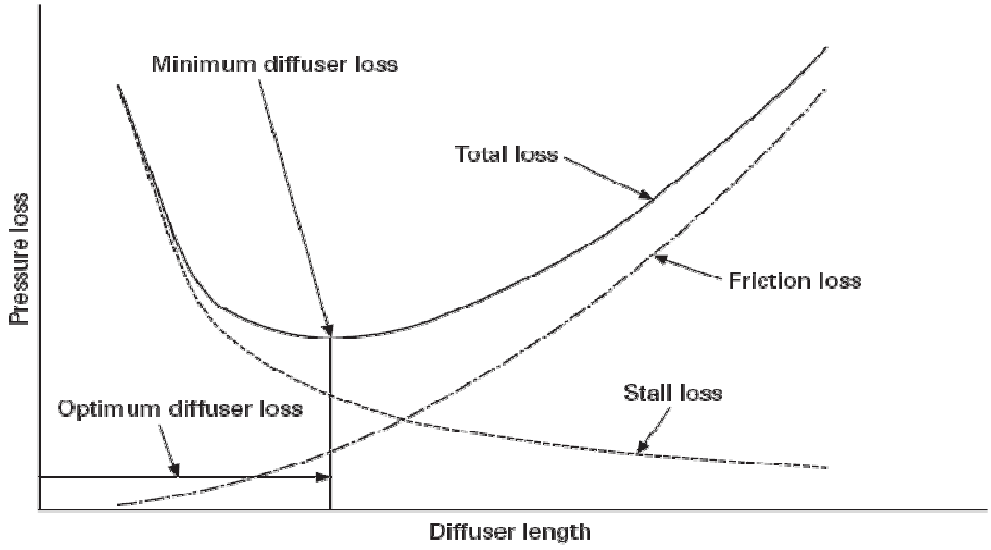


Schematic representation of a straight walled diffuser.

برای یک نسبت مساحت(area ratio) معین، طول افشاننده تاثیر زیادی بر عملکرد آن دارد. به گونه ای که اگر طول افشاننده بسیار زیاد باشد، به دلیل وجود اصطکاک، افت فشار بسیار بالا خواهد بود.

http://www.mohandes-iran.com

اگر طول افشاننده نیز بسیار کم باشد، جریان معکوس(adverse flow) بوجود می آید که موجب ایجاد یک جریان مخالف می شود که در نهایت این امر علاوه بر اینکه افت فشار بالاتری تحت عنوان فشار توقف (stall Loss) به دنبال دارد، موجب متوقف شدن سیستم می شود.در شکل زیر، تاثیر طول افشاننده بر عملکرد آن نشان داده شده است: همانطور که در شکل مشاهده می شود، طول بهینه ای وجود دارد که در آن افت فشار به حداقل می رسد.



Influence of a diffuser length on pressure loss for a given area ratio.

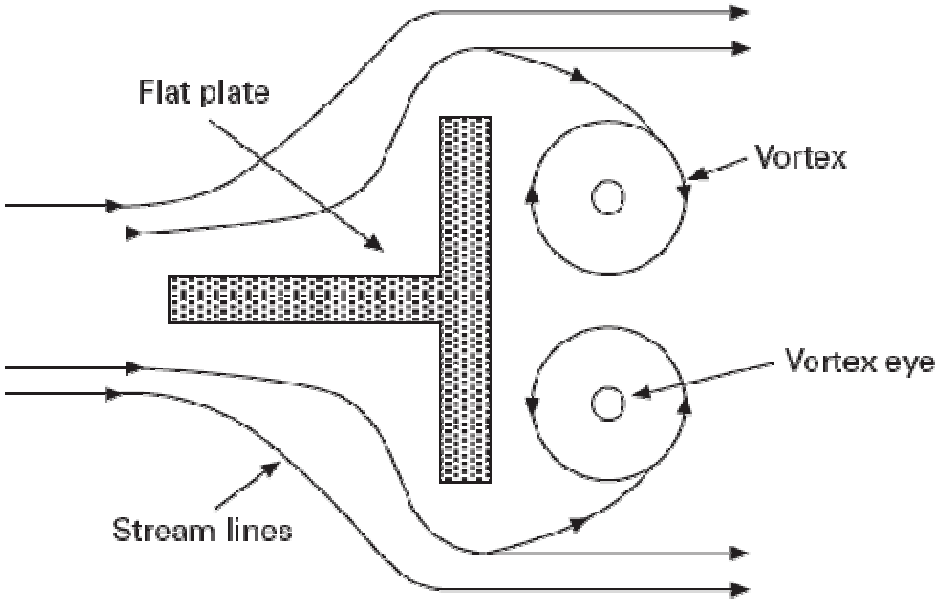
نازل سوخت(fuel nozzle) و ناحیه اصلی (primary zone):

سرعت هوای خروجی از افشاننده در حدود 25m/s است.اما در عمل سوخت های هیدروکربنی می توانند در سرعت های پایین تری(5-7 m/s) بسوزند.بنابراین در صورتی که فرآیند احتراق در این سرعت از جریان هوا صورت گیرد، بی نتیجه بوده و شعله به سرعت خاموش می شود.زیرا فرآیند احتراق یک واکنش شیمیایی بوده که به زمان بیشتری جهت انجام واکنش(تشکیل رادیکال ها و ذرات دیگر) نیازمند است.

http://www.mohandes-iran.com

بنابراین، سرعت هوا می بایست به میزان چشمگیری کاهش یابد تا فرآیند احتراق به خوبی صورتگیرد.بنابراین در ناحیه ی اصلی، می بایست اجزایی با نام اجسام شیب دار(Bluff bodies) نصب شوند. این اجزا که به شکل های مختلف مانند صفحه ی تخت و ... ساخته می شوند، به صورت یک مانع عمل کرده و سرعت هوا را کاهش می دهند. همانطور که در شکل صفحه ی بعد مشاهده می شود، جریان هایی که از bluff body عبور می کنند، در ادامه به جریان های گردابی(vortices) تفکیک می شوند.

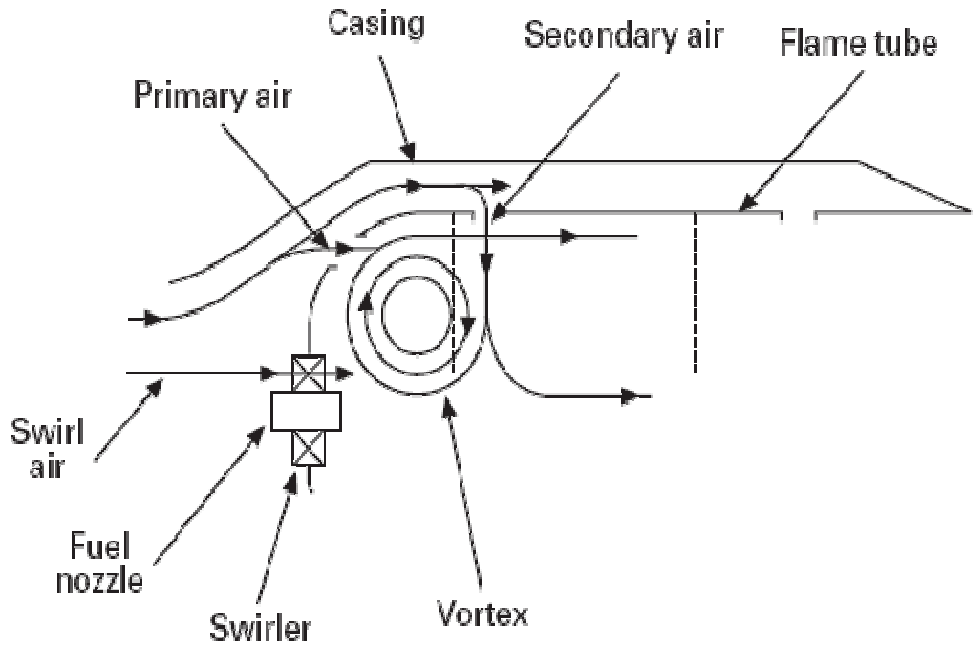
سرعت در چشمه این گردابه ها(vortex eye) به صفر می رسد و هرچه از مرکز این گردابه ها دورتر می شویم .به این گردابه ها، گردابه های اجباری(forced vortex) گفته می شود. می توان عمل احتراق را با تزریق کردن سوخت به چشمه گردابه آغاز کرد.در چشمه گردابه، همانطور که قبلا اشاره شد، سرعت هوا به کمتر از سرعت شعله می رسد. بنابراین در آن زمان کافی جهت آغاز فرآیند احتراق وجود دارد.



Flow passing over a bluff body.

http://www.mohandes-iran.com

در سیستم های احتراقی توربین گازی، هوا از طریق حفره های اولیه و ثانویه به داخل هدایت می شود. این جریان ها، موجب ایجاد گردابه های اجباری می شوند و می توانند میزان شدت آشفتگی را در ناحیه اصلی افزایش دهند که خود موجب پایداری بیشتر شعله و آزاد شدن گرمای بیشتر می شوند. بیشترین گرمای تولیدی در توربین در بخش اصلی آزاد می شود. همانطور که در شکل زیر دیده می شود، سوخت از طریق نازل که در کنار چشمه گردابه قرار دارد تزریق می شود.در ادامه، سوخت با هوایی که به صورت چرخشی وارد می شود(swirl air) مخلوط می شود، که این امر موجب پراکنده شدن ذرات سوخت و ایجاد قطرات آن می شود. عمل سوختن در ناحیه ای در نزدیکی چشمه گردابه آغاز می شود. جهت سوختن کامل سوخت، سوخت در گردابه مدت زمانی به حالت سکون باقی می ماند که به آن زمان ماند(residence time) می گویند.



Section through a typical gas turbine combustor.

http://www.mohandes-iran.com

ناحیه میانی (intermediate zone) :

نسبت تعادل(Ø) در ناحیه اصلی در حدود یک است، و دمای گازهای خروجی از این ناحیه در حدود 2000K است. در چنین دمایی، فرآورده واکنش دارای رادیکال و ذراتی از سوخت خواهد بود(UHC) که هنوز نسوخته اند.همچنین CO نیز از فرآورده های دیگر در این دماست. در صورتی که، فرآورده های فوق مستقیما به ناحیه رقیق سازی هدایت شوند، به دلیل میزان هوای زیاد وارد شده در این بخش، فرآورده خاموش می شود.در اینحالت، آلاینده های زیادی ظاهر می شوند که خود مشخصه ای از بازدهی ضعیف در احتراق است. در واقع، در ناحیه میانی از طریق مخلوط شدن مقداری هوا با فرآورده تشکیل شده در ناحیه اصلی، امکان تشکیل ذرات آلاینده کاهش کم تر می شود. در ناحیه میانی، از طریق ورود هوا و کاهش دما، امکان تشکیل دی اکسید کربن و آب کم می شود که این امر احتمال تشکیل آلاینده ها را کم می کند.

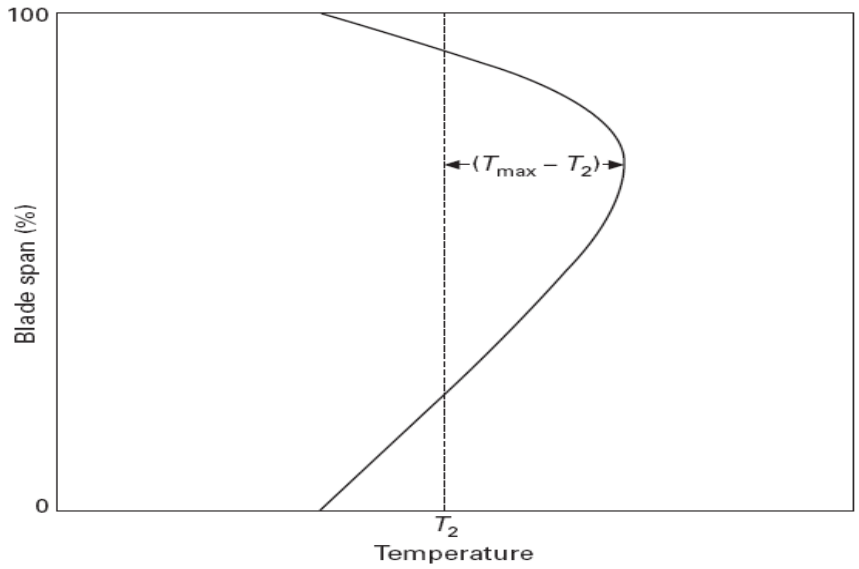
ناحیه رقیق سازی (dilution zone)

گازهای احتراقی که از ناحیه میانی عبور می کنند، دارای دمایی در حدود 1800K هستند که این دما،همچنان دمای بالایی برای قسمت پایینی جریان(downstream) در توربین است.برای اینکه گازی که در توربین قدرت وارد می شود دارای شرایط لازم(به خصوص از نظر دما) باشد، باید آن را از قسمتی گذراند که با هوای اضافی مخلوط شود. این کار در ناحیه رقیق سازی صورت میگیرد. جهت سنجش کیفیت عمل اختلاط در ناحیه رقیق سازی از پارامتری به نام "فاکتور الگو(pattern factor)" استفاده می شود.این پارامتر به صورت زیر تعریف می شود:

$$PF = \frac{T_{\max} - T_2}{T_2 - T_1}$$

http://www.mohandes-iran.com

که در آن: T_{max} دمای حداکثر، T_2 میانگین دمای خروجی، T_1 دمای ورودی محفظه احتراق است که معمولا برابر با دمای خروجی کمپرسور است.0.2 میزان مناسبی برای فاکتور الگو است. شکل زیر، نمونه ای از توزیع دمای خروجی از محفظه احتراق را بر حسب درصد تغییر گام تیغه نشان می دهد:



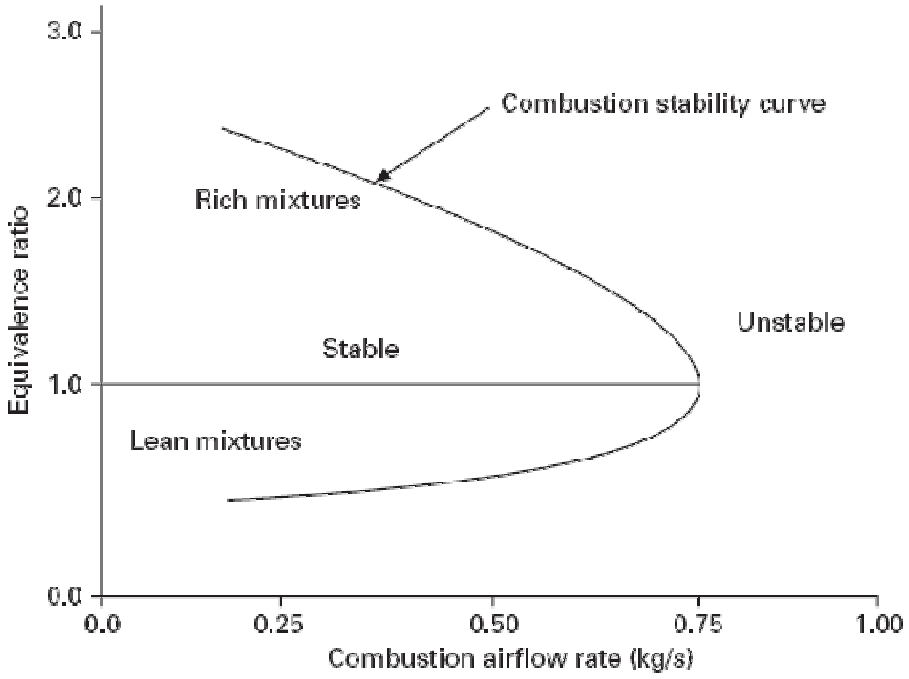
Typical combustor temperature exit profile.

پایداری سوختن(combustion stability) و آهنگ آزاد سازی گرما(heat release rate):

در عمل، امکان انجام فرآیند سوختن، تنها در محدوده خاصی از نسبت های سوخت-هوا و نسبت های تعادل وجود دارد.

http://www.mohandes-iran.com

شکل زیر، نمونه ای از حلقه پایداری سوختن(combustion stability loop) را نشان می دهد که درآن، نسبت تعادل بر حسب دبی هوای مصرفی رسم شده است. برای دبی خاصی از هوای مصرفی، هم برای سوخت های با ارزش حرارتی پایین و هم سوخت های غنی،در محدوده ای در این حلقه، فرآیند سوختن پایدار است.با افزایش دبی هوا، محدوده ای از نسبت تعادل که در آن پایداری وجود دارد کم می شود، و در یک دبی خاص، محدوده پایداری به نسبت تعادل یک میل می کند.

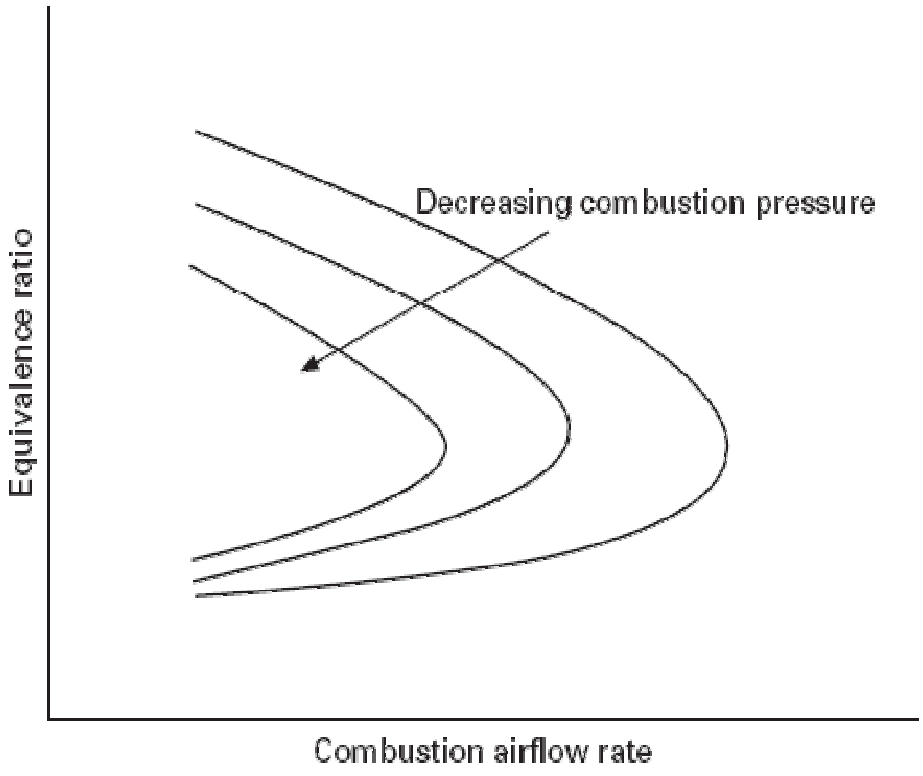


Typical combustion stability curve.

همانطور که قبلا اشاره شد، در نسبت تعادل یک، سوخت و هوا به نسبت استوکیومتری مخلوط می شوند شکل صفحه بعد نیز، تاثیر فشار را بر حلقه پایداری نشان می دهد. با کاهش فشار سوختن، حلقه پایداری کوچک تر می شود.به عبارت دیگر سوختنی که در فشار بالاتر صورت می گیرد، محدوده پایداری بیشتری دارد. برای یک نسبت تعادل و دبی مشخص از هوا دبی سوخت را می توان با رابطه زیر محاسبه کرد،که در آن mf و ma به ترتیب دبی سوخت و هوا است:

$$mf = ma \times \Phi \times (FAR)s$$

http://www.mohandes-iran.com



Effect of combustion pressure on stability.

آهنگ آزاد سازی گرما(heat release rate , HRR) نیز با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$HRR = ma \times \Phi \times (FAR)s \times Q_{net}$$

که در آن، Q_{net} حد پایینی ارزش حرارتی(LHV) در اثر سوختن است.حد پایینی ارزش حرارتی سوخت(lower heating value, LHV) که ارزش حرارتی خالص(net heating value) نیز نامیده می شود، میزان گرمای آزاد شده با فرض تولید آب به صورت بخار است.از آنجایی که آب مایع مقداری از گرما را جذب کرده و بخار شده، حد پایینی نامیده می شود. حد بالایی ارزش حرارتی سوخت (higher heating value, HHV) که ارزش حرارتی ناخالص(gross heating value) نیز نامیده می شود، میزان گرمای آزاد شده با فرض تولید آب به صورت مایع است.در این صفحه و صفحه بعدی، ارزش حرارتی برخی از سوخت های گازی بیان شده است.

http://www.mohandes-iran.com

Gas	Gross Heating Value		Net Heating Value	
	(Btu/ft³)	(Btu/lb)	(Btu/ft³)	(Btu/lb)
Acetylene (ethyne) - C_2H_2	1,498	21,569	1,447	20,837
Benzene	3,741	18,150	3,590	17,418
Blast Furnace gas	92	1,178	92	1,178
Blue water gas	-	6,550	-	-
Butane - C_4H_{10}	3,225	21,640	2,977	19,976
Butylene (Butene)	3,077	20,780	2,876	19,420
Carbon to CO_2	-	14,150	-	14,150
Carbon to CO	-	3,960	-	3,960
Carbon monoxide - CO	323	4,368	323	4,368
Carburetted Water Gas	550	11,440	508	10,566
Coal gas	149	16,500	-	-
Coke Oven Gas	574	17,048	514	15,266
Digester Gas (Sewage or Biogas)	690	11,316	621	10,184
Ethane - C_2H_6	1,783	22,198	1,630	20,295
Ethyl alcohol saturated with water	1,548	12,804	-	-
Ethylene	1,631	21,884	1,530	20,525
Hexane	4,667	20,526	4,315	18,976
Hydrogen (H_2)	325	61,084	275	51,628
Hydrogen Sulphide	672	7,479	-	-
Landfill Gas	476	-	-	-
Methane - CH_4	1,011	23,811	910	21,433

Gas	Gross Heating Value		Net Heating Value	
	(Btu/ft³)	(Btu/lb)	(Btu/ft³)	(Btu/lb)
Methyl alcohol saturated with water	818	9,603	-	-
Naphthalene	5,859	17,298	-	-
Natural Gas (typical)	950 - 1,150	19,500 - 22,500	850 - 1,050	17,500 - 22,000
Octane saturated with water	6,239	20,542	3,170	10,444
Pentane	3,981	20,908	3,679	19,322
Producer gas	-	2,470	-	-
Propane - C_3H_8	2,572	21,564	2,371	19,834
Propene (Propylene) - C_3H_6	2,332	20,990	2,181	19,630
Propylene	2,336	21,042	2,185	19,683
Sasol	500	14,550	443	13,016
Sulphur	-	3,940	-	-
Toulene	4,408	18,129	4,206	17,301
Water Gas (bituminous)	261	4,881	239	4,469
Xylene	5,155	18,410	-	-

http://www.mohandes-iran.com

پس بنابراین میتوان از گفته های بالا نتیجه گرفت که در حقیقت وظیفه اصلی یک اطاق احتراق دریافت هوای فشرده شده از خروجی کمپرسور و انجام احتراق کامل روی سوختهای وارد شده به آن به شکل مداوم است .اگر بعد از افزایش فشار هوا بوسیله کمپرسور هوا مستقیمًا وارد توربین شود (توربینی که کمپرسور را می چرخاند) وهیچ انرژی دراین میان ازبین نرود انرژی حاصل شده درمحورخروجی توربین تقریبًا معادل انرژی مورد نیازبرای چرخش کمپرسورمی بود وهیچ توان اضافی در خروجی شافت توربین باقی نمی ماند پس کاری صورت نگرفته جز هرز رفت انرژی منتقل شده توسط استارتر . لذا می بایست کاری کرد که انتالپی هوای خروجی کمپرسور را به مقدار زیاد افزایش داد که این افزایش با استفاده ازسوخت در محفظه احتراق صورت می گیرد.

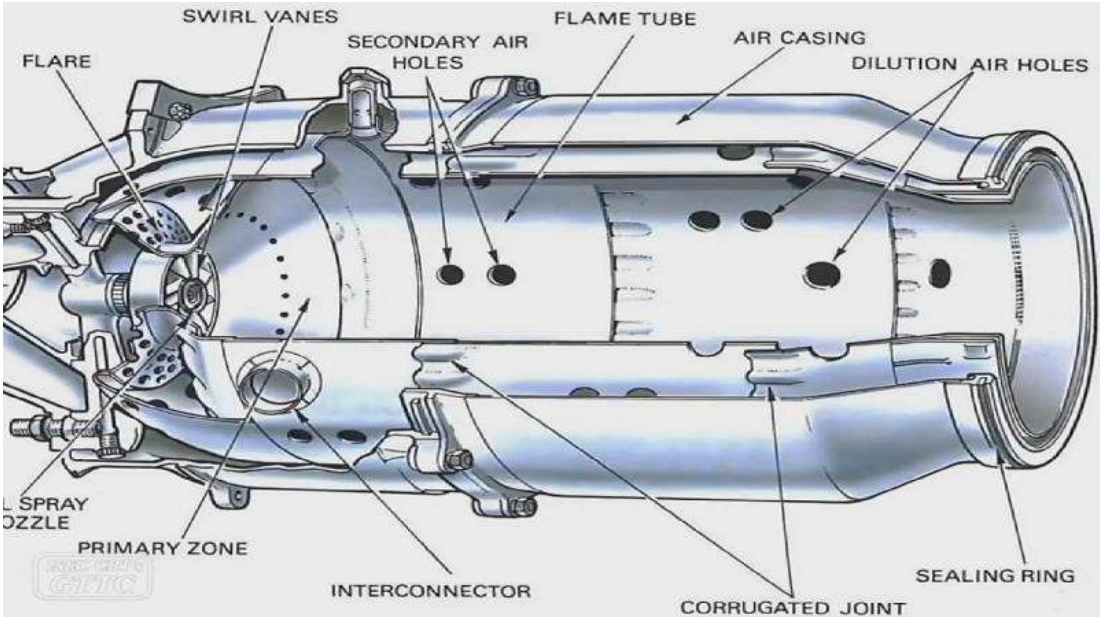
درتوبین های گازی چند نکته مهم درطراحی سیستم احتراق درنظر گرفته می شود به جز بعضی کاربردهای خاص فضای احتراق نسبتًا کوچک وتوزیع حرارت هوای خروجی ازاتاق احتراق تاحد امکان یکدست است تاکارایی خوبی داشته باشد همچنین جهت جلوگیری از ایجاد حرارت حرارت اضافه نقطه ای (Hot Spot) احتراق می بایستی مستمر و پایدا ر باشد ، اگرفرآیند احتراق کامل نباشد موجب تشکیل ذرات کربنی شده که به لحاظ سرعت بالای این ذرات سایش وکندگی تیغه توربین وبطبع آن کاهش عمرمفید تیغه ها وتوربین را بدنبال دارد . پیامد دیگر م سائل اتاق احتراق فشار و درجه حرارت زیاد خستگی مصالح . تنش حرارتی وارده به اجزاء آن است که توجه به آنها اهمیت بسیاری دارد .توزیع هوا دراتاق احتراق به شرح ذیل است.

۱۵ تا ۲۰ درصد هوا از تیغه های شکل دهنده جریان SWIR/RANE عبورمی کند عبورهوا ازاین بخش موجب افشان شدن کامل سوخت (که معمولا بعضی اوقات باقطرات سوخت همراه است) می شود .که نتیجه آن اختلاط کامل سوخت و هوا ونیز احتراق آن دردرجه حرارت بالا است حدود ۳۰٪ هوا از مجاری خاص به بخش دوم اتاق احتراق هدایت می شود تا عمل سوختن کامل شود . بقیه هوا در بخش سوم اتاق احتراق برای همگن کردن محصول اختراق ونیزخنک کردن اتاق احتراق مصرف می شود.

http://www.mohandes-iran.com

تا برای ورود به تیغه های ثابت توربین آماده شود . دراین بخش همگن کردن محصول احتراقدرحدی بایستی صورت گیرد که ازایجاد نقطه های داغ Hot Spotدر مسیر عبوری خود جلوگیری کند تعداد محفظه احتراق بستگی به طراحی ساخت وقدرت مورد نیازمی باشد که ممکن است توربین دارای یک محفظه احتراق یا چندین محفظه احتراق مجزا باشد.

دومین مرحله ذخیره سازی انرژی دردرون اتاق احتراق اتفاق می افتد . اگربعدازفشارافزایی هوا مستقیما وارد توربین شود وهیچ انرژی دراین میان از بین نرود انرژی ترخیص شده درمحورتوربین معادل انرژی مورد نیاز برای چرخش کمپرسور می بود وهیچ توانی درخروجی شافت توربین باقی نمی ماند . هدف ازاحتراق هوا افزودن انرژی حرارتی درهوا بوسیله افزودن درجه حرارت آن است باید به این نکته توجه کرد که افزایش درجه حرارت ورودی به توربین(خروجی اتاق احتراق) عمومًا با افزایش فشارخروجی کمپرسورهمراه است وحد نهایی فشار مقداری است که به کمپرسورتوانایی تامین آنرادارد دراتاق احتراق انرژی شیمیایی به افزایش انتالپی هوا تبدیل م ی شود . به فرض احتراق کامل انرژی موجود دریک توربین گازی برای تعدادی سوخت درجدولموجود در صفحات قبل نشان داده شده است



نمایی از یک محفظه احتراق

http://www.mohandes-iran.com

انواع متداول محفظه احتراق در صنعت:

۱)نوع اول محفظه احتراق از یک اطاق احتراق بزرگ که به شکل عمودی نست به شفت قرار دارد استفاده می شود. بخشی از هوای ورودی از کمپرسور وارد آن می شود وصرف انجام عمل احتراق می گردد و بقیه صرف رقیق کردن محصولات احتراق و رساندن دمای آنها به مقدار قابل تحمل پره های توربن میشود.

۲)در نوع دوم دو اطاق احتراق نسبتا بزرگ در دو طرف توربین و به صورت افقی نسبت به زمین قرار دارند در این مدل هوای خروجی از کمپرسور در اطراف اطاقهای احتراق جریان یافته و سوخت در هر اطاق احتراق توسط هشت نازل سوخت به داخل آن پاشیده میشود محصولات احتراق وارد یک محفظه مخلوط کن Mixing Chamber شده و سپس به سمت توربین هدایت شده.

۳) در نوع سوم یک محفظه احتراق بزرگ و مشعل در مرکز قرار گرفته است.هوای خروجی از کمپرسورر از مجاری مختلف به منظور احتراق، اختلاط و رقیق سازی وارد آن میشود.عموما این دسته به نام Annular Typeمعروف هستند.

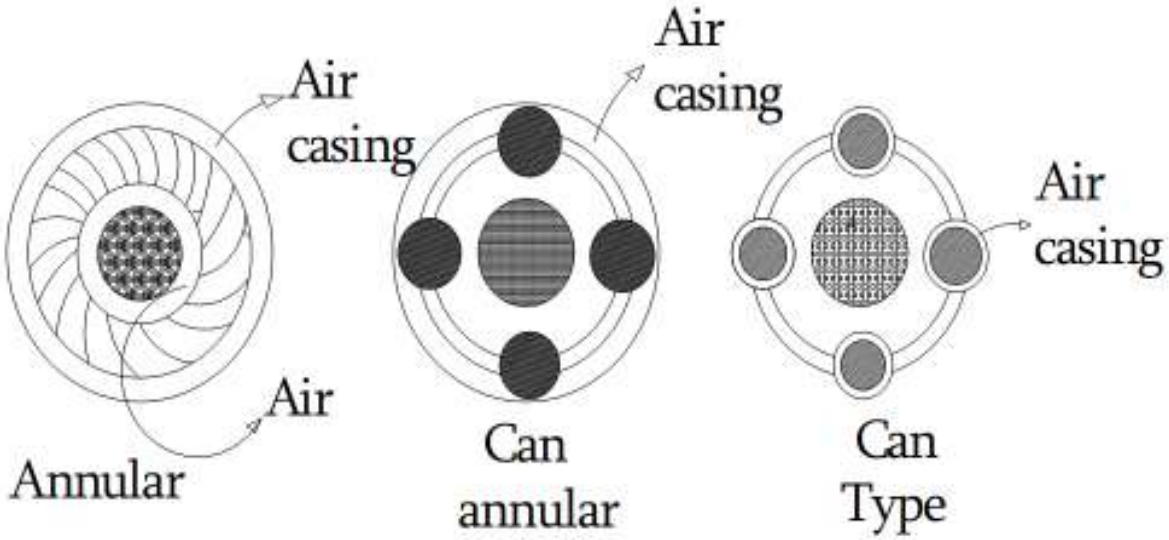
۴)در این نوع از توربین های گازی که به Can Type معروفند یا محفظه احتراق چندتایی (Multiple combustion chamber)موسومند. تعداد اطاق احتراق حلقوی در دور تا دور کمپرسور با تعداد زیادی نازل سوخت پاش استفاده میشود دز نوعی، این این مد ها هوای خروجی از کمپرسور در کنار اطاقهای احتراق در مسیری کاملا برعکس حرکت کرده و در نهایت از مجراهای در نظر گرفته شده برای عمل احتراق و رقیق سازی وارد اطاقهای احتراق میشوند این نوع بهWhittle موسوم اند.

http://www.mohandes-iran.com

۵) این محفظه احتراق ترکیبی از دو نوع قبل است بدین صورت که متشکل ازتعدادی لوله های شعله بوده که دور تا دور تمام آنها توسط دو پوشش حلقوی داخلی و خارجی شده است.

Inner casing and outer casing

مانند نوع چندتایی لوله های شعله توسط لوله های اتصال دهنده به یکدیگر مربوطند.لوله های شعله توسط لوله های اتصال دهنده به یکدیگر مرتبطند.در دهانه ورودی هر شعله یک وخت پاش قرار دارد که سوخت را به صورت پودر پاشیده و به هوای ورودی موجود در آن منطقه مخلوط می کند از آنجایی که این نوع دستگاه از مزایای هر دو نوع قبلی برخوردار است بنابراین بهنرین نوعی است که امروزه در بیشتر متورهای جت مدرن مورد استفاده قرار می گیرد.



http://www.mohandes-iran.com

همانطور که از گفتهای این فصل و شکلهای موجود در این فصل پیداست یک محفظه احتراق از سه قسمت اصلی تشکیل شده است:

۱)نازلهای سوخت Fuel Nozzle: یک نازل سوخت که برای پاشش سوخت به داخل اطاق احتراق تعبیه شده است میتواند برای سوخت گاز یا گازوئیل و یا هر دو و با ارزشهای حرارتی متفاوت مورد استفاده قرار بگیرد برای ورود گازوئیل یا سوختهای سنگین به داخل اطاق احتراق باید کاملا دقت کرد که سوخت بطور کامل پودر یا اتامایز شود.

۲)محفظه احتراق:Combustion Chamber: در هر محفظه احتراق سه قسمت قابل تشخیص است:

- منطقه مخلوط کردن هوا یا Mixing Zone
- منطقه اشتعال یا Combustion Zone
- منطقه رقیق کردن گازهای حاصل یا Dilution Zone

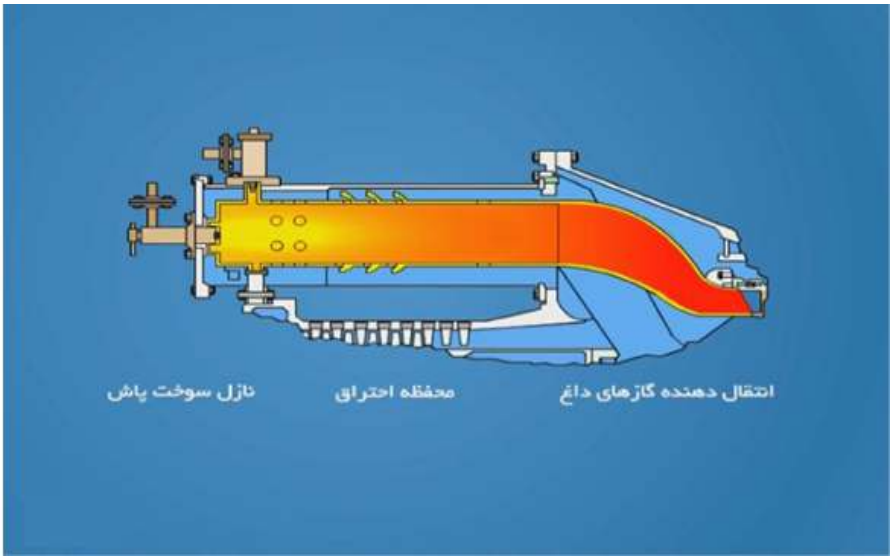
وظیفهٔ اصلی نواحی اختلاط و اشتعال، تشکیل و برقراری شعله و تأمین همزمان، دما و تلاطم مناسب جهت رسیدن به احتراق کامل در حضور مخلوط سوخت و هوا است .در این ناحیه، چرخش دربخشی از گازهای داغ به منظور اشتعال پیوسته در سوخت و هوای ورودی صورت می پذیرد پس از مخلوط شدن هوا و سوخت توسط هوای به دوران در آمده، شعله توسط جرقه زنهای ثابت و یا موقت بر قرار می شود .پس از برقراری شعله، مخلوط هوا و سوخت بطور کامل مشتعل شده و دمای سیال بشدت بالامی رود.در صورتیکه سوخت در منطقه احتراق بطور کامل نسوزد، ممکن است مقداری از سوخت وارد بخش رقیق سازی شده و در آنجا احتراق یابد .بر اثر این عمل، دمای گازهای احتراق در این بخش بالا رفته و دمای گازهای ورودی به بخش توربین افزایش میابد .این افزایش دما سبب ایجاد صدمات جدی به پره های ثابت و متحرک توربین خواهد شد.نسبت هوا به سوخت برای احتراق کامل سوخت های گازی 10 به 1 و برای سوخت های مایع برابر 16 به 1 است .در طرح هایی که تعدادی اطاق احتراق، در اطراف کمپرسور برای احتراق وجود دارد، دو عدد

http://www.mohandes-iran.com

جرقه زن نیز دردو اطاق احتراق مجاور هم قرار دارند و در نقطه مقابل هم دو شعله بین تعبه می گردد این اطاقهای احتراق توسط لولهای رابط بهیکدیکر متصل شده و پس از برقراری شعله در یکی از آنها شعله از این لولهای رابط به سایر اطاقهای احتراق منتقل میشود تا شعله بین در طرف مقابل شعله را ببیند و اجازه ادامه کار را بدهد . برای حفظ محفظه های احتراق از سوختن در این درجه حرارت بالا باید آنها را بطور مرتب خنک کرد.

۳) قطعه یا قطعات انتقال دهنده گازهای داغ:

دمای بالای محصولات احتراق می بایست تا حد تحمل پره های ثابت و متحرک ردیف اول کاهش یابد این عمل در انتهای اطاق احتراق و یا در قطعه یا قطعات انتقال دهنده گازهای داغ انجام می گیرد عموما در این منطقه مقدار زیادی از هوای خروجی کمپرسور تحت عنوان هوای ثانویه به شکل مستقیم و با وجود یک سامانه کنترل مقدار، وارد اطاق احتراق شده و دمای آنها را تا حد مجاز پایین می آورد

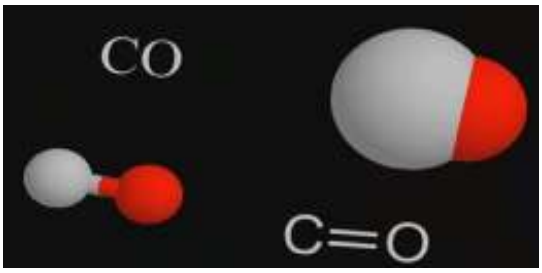


تاثیرات زیست محیطی دودهای حاصل از احتراق:

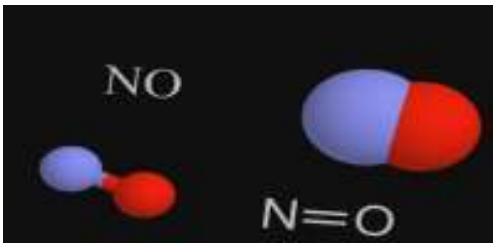
http://www.mohandes-iran.com

معمولاً گازهای حاصل از احتراق دارای ترکیبات چون منو اکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن(NOx) ، اکسیدهای سولفور (SOx)هستند که آلاینده محیط زیست و مضر برای انسان میباشند .لذا تمهیداتی به منظور حذف آنها از گازهای خروجی در نظر گرفته می شود.

مونو اکسید کربن، گازی بی رنگ و بی بو است که در اثر سوختن ناقص، کربن موجود در سوخت پدید می آید .استنشاق این گاز سبب کاهش یافتن میزان اکسیژنی که هر یک از اندامهای مهم بدن مانند مغز،قلب و بافت ها دریافت می کنند، شده و می تواند باعث بروز مخاطرات فراوان برای انسان شود .میزان انتشار مونو اکسید کربن در توربین گازی بیشتر تابعی از نحوه و چگونگی طراحی محفظه احتراق می باشد

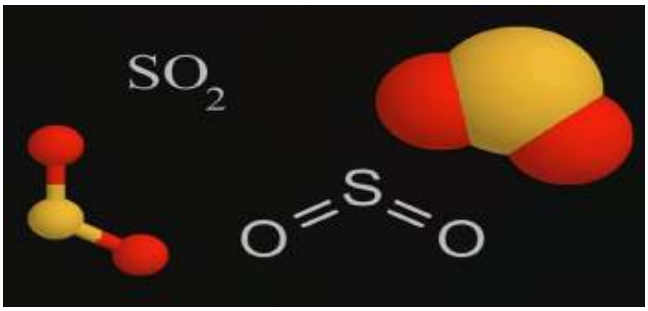


اکسیدهای نیتروژن نیز گستره وسیعی از ترکیبات نیتروژ ن دار را شامل میشوند که اثرات زیان آوری برسلامت انسان و محیط زیست از خود برجای میگذارند .این ترکیبات نیتروژن دار در صورت واکنش با برخی عناصر و ترکیبات موجود در جو باعث بوجود آمدن ترکیبات جدید و بسیار خطرناکی خواهند شد.اکسیدهای نیتروژن د فرآیند احتراق توربین های گازی بیشتر به صورت مونو اکسید نیتروژن (NO) تولید می شوند .به طور کلی ازدیاد انتشار اکسیدهای نیتروژن نسبت مستقیم با ازدیاد دمای محفظه احتراق و نیز چگونگی طراحی محفظه احتراق دارد.



اکسیدهای سولفور نیز بیشتر زمانی پدید می آیند که سوخت مورد استفاده حاوی سولفور باشد. این گاز نیز بخوبی در آب حل شده و تشکیل اسید داده و یا با سایر ترکیبات در هوا ایجاد سولفات می کنند که هر دو حالت برای سلامت انسان مضر است

http://www.mohandes-iran.com



هیدروکربن های نسوخته (unburned hydrocarbons , UHC)

NO_X به دلیل انجام فرایند احتراق در دماهای بالا از اکسایش ازت موجود در هوا تولید می شود.

CO و UHC نیز به دلیل بازده پایین احتراق و سوختن ناقص سوخت تولید می شود.

NO_Xمنجر به آلودگی هوا، بارش باران های اسیدی و کاهش ضخامت لایه اوزون می شود.

CO نیز یک گاز سمی است.UHC نه تنها یک گاز سمی است بلکه در صورت ترکیب شدن با NO_x می تواند منجربه آلودگی هوا شود.از دیگر گازهای تولیدی در فرآیند احتراق در توربین های گازی بخارآب(H_2O) و دی اکسید کربن (CO_2) است که به دلیل اکسایش هیدروژن و کربن تولید می شوند.گرچه گازهای H_2O و CO_2 غیرسمی هستند، اما به از گازهای گلخانه ای هستند و منجر به گرم شدن کره زمین می شوند. جهت کاهش آلودگی های زیست محیطی در دهه های اخیر اقدام به تولید سیستم های احتراق با انتشار خشک و پایین گازهای سمی و آلاینده (dry low emission , DLE) شده است. گرچه سیستم های احتراقی DLE میزان انتشار گازهای سمی و آلاینده UHC، NO_x و COرا به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهند اما ایجاد گازهای غیرسمی H_2O و CO_2 را تنها با افزایش بازده گرمایی توربین می توان کاهش داد. در صورت استفاده از سیکل های ترکیبی و میزان انتشار گازهای H_2Oو CO_2کاهش می یابد. در سیکل های ترکیبی از گازهای داغ خروجی مجددا در چرخه استفاده می شود و به این طریق بازده گرمایی کلی توربین افزایش می یابد. همچنین می توان $CO2$ خروجی را توسط حلال هایی مانند متانول آمین(MEA) جذب کرد و از ورود آن به اتمسفر جلوگیری کرد.

http://www.mohandes-iran.com

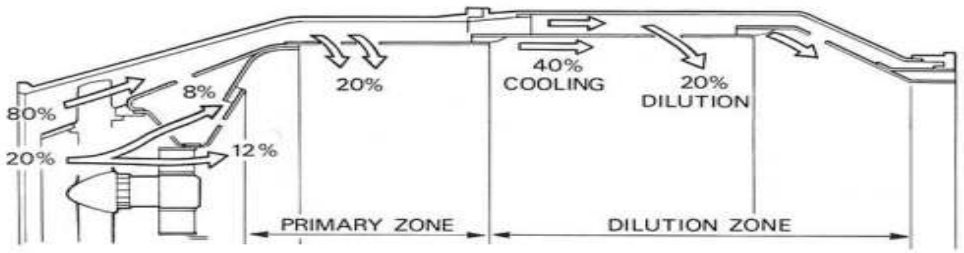
به منظور کاهش انتشار مواد آلاینده فوق، امروزه توربین هایی به بازار عرضه شده اند که در آنها بهینه سازی طراحی محفظه های احتراق جهت تولید و انتشار کمتر ترکیبات مضر،مدنظر قرار گرفته است.لزوم استفاده از محفظه های احتراق با قابلیت بالای کاهش ترکیبات مضر احتراق در توربین های گازی،اینک در حال تبدیل شدن به یک استاندارد و الزام برای سازندگان توربین میباشد و توربین های گازی برخوردار از این تکنولوژی اصطلاحا dry low emission نامیده می شود. در بعضی از توربین ها با استفاده از سیستمی بنام سیستم NO_X مقداری آب با فشار بالا و به شکل پودر شده به داخل محفظه احتراق تزریق می گردد این عمر سبب کاهش و حذف آایندها می گردد

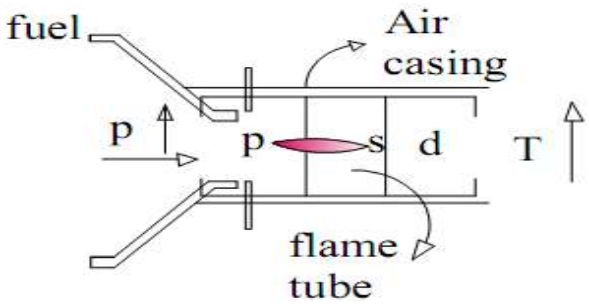
به طور خلاصه و کلی اگر بیان کنیم فرایند احتراق شامل دو مرحله است:

۱. احتراق یا واکنش Reaction
۲. رقیق کردن هوا Dilution

محفظه احتراق شامل قسمتهای زیر است:

۱)لوله شعله Flame tube ۲) لوله عبور هوا Air casing
۳)تعدادی سوخت پاش Fuel ۴) احتراق یا آتش زنه Ignited





http://www.mohandes-iran.com

توربین قدرت Power Turbine:

در توربین کمپرسور Compressor turbine هوای داغ و منبسط شده از قسمت خروجی محفظه احتراق زانویی داغ " Hot elbow " بطرف توربین کمپرسور هدایت میشود . توربین کمپرسور از دو قسمت تیغه های ثابت" Stator Blades " و تیغه های متحرک " Rotor Blades " ساخته شده است که کلاً دارای دو مرحله "Stage " می باشد .هوای داغ از لابه لای تیغه های ثابت عبور کرده و سرعت می گیرد و نهایتاً توربین کمپرسور شروع به چرخش می کند تیغه های متحرک در کمپرسورتحت تأثیر دو نیرو قرار می گیرند :

۱- نیروی ضربه ای " Impulse Force " که هنگام برخورد گاز ایجاد می شود .

۲- نیروی عکس العمل " Reaction Force " که هنگام خروج گاز بوجود می آید .

هوای منبسط شده پس از چرخاندن توربین کمپرسور با انرژی حرارتی کافی از طریق محفظهٔ میانی "Intermediate Duct " به تیغه های توربین بار " نیرو" برخورد کرده و این تیغه ها نیز تحت تأثیر نیروی ضربه ای و عکس ا لعملی قرار می گیرند ساختمانی این دستگاه مانند توربین کمپرسور می باشد و دو مرحله ای بوده که طول تیغه های ثابت و متحرک توربین قدرت بدلیل استفاده بیشتر از انرژی جنبشی گاز و از طول تیغه های کمپرسور توربین بلند تر می باشند ومحور بازده "Out Put Shaft" از طریق جعبه دنده به دستگاهی که باید چرخانده شود متصل می گردد . جعبه دنده ها بنا به نیاز یا تقلیل دهنده " کاهنده " "Reduction Gear Box " و یا افزاینده " In Crease Gear Box " می باشند بطور کلی کلی محورهای چرخنده احتیاج به تکیه گاه و یاتاقان دارند که در توربین نیز از انواع یاتاقانها در قسمتهای لازم استفاده شده است .

در واقع انبساط گاز و نیروی ضربه حاصل از برخورد گاز به پره های متحرک توان توربین گازی را تامین می کند و از این توان دو سوم صرف فشرده شدن هوا می شود و بقیه صرف کارهای دیگری مانند تولید برق یا راندن مکانیکی می‌شود.

http://www.mohandes-iran.com

علاوه بر موارد بالا، برای افزایش کارایی توربین گازی ممکن است شامل کولرهای خنک کننده بین کمپرسور ها ، مبدلهای حرارتی بین توربین ها و مبدل های حرارتی برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه احتراق باشد.

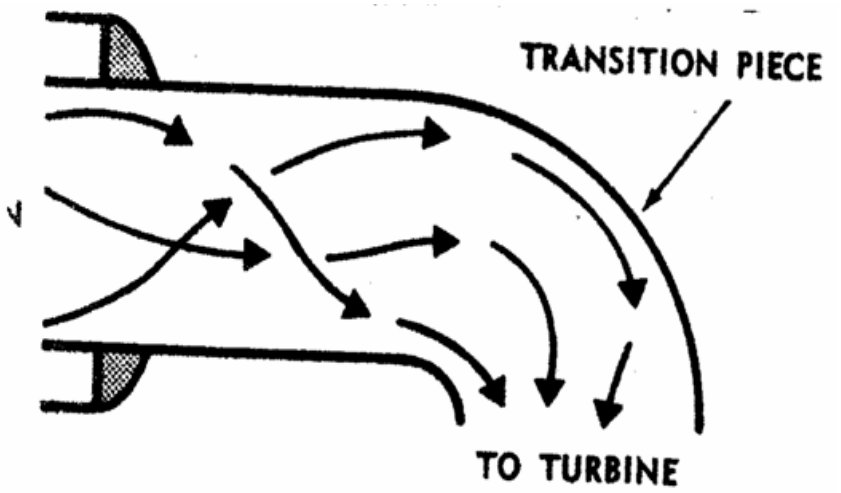
همانطور که می دانیم، در یک توربین هدف نهایی، تبدیل انرژی به انرژی مکانیکی است، که این کاردر نهایت در توربین قدرت(power turbine) صورت می گیرد. به طور کلی، همانند کمپرسورها، دو نوع عمده از توربین وجود دارد که عبارتند از توربین جریان شعاعی و توربین جریان محوری. به لحاظ امکان ایجاد تنش های حرارتی ناشی ازدرجه حرارت زیاد، توربینهای جریان شجاعی معمولا برای توربینهای گازی بادرجه حرارت بالا قابل استفاده نیستند .همانند کمپرسورهای جریان محوری، هوای داغ فشرده درون اتاق احتراق ازیک سری مراحل توبین عبورمی کند . هر مرحله شامل یک ردیف تیغه های ثابت است(stator blades) که در بدنه قراردارند. همچنین یک ردیف تیغه های متحرک(rotor blades) روی یک دیسک متحرک قرارگرفته اند. به محض آنکه گازداغ به تیغه های ثابت برسد منبسط می شود و فشارگازآن به انرژی جنبشی تبدیل می شود ، این فرآیندکاملا عکس فرآیند فشارافزایی است .

پارامتر های زیر، میزان انرژی مکانیکی قابل استحصال را تعیین می کنند:

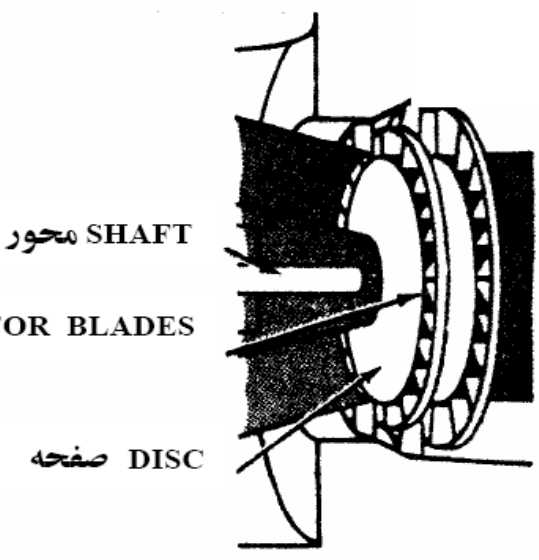
- طرح و پروفیل(profile) تیغه های ثابت و متحرک
- درجه حرارت گاز ورودی به توربین از محفظه احتراق
- فشار گاز ورودی به توربین از محفظه احتراق
- تعداد مراحل (تعداد ردیف تیغه ها) در توربین

گاز داغ، از قسمت خروجی محفظه احتراق، بوسیله کانال انتقال دهنده گاز(Transition Piece) به طرف توربین هدایت می شود .

http://www.mohandes-iran.com



دستگاه چرخنده توربین(Turbine Rotor)، مثل دستگاه چرخنده کمپرسور(Compressor Rotor) شامل تعدادی صفحه(Disk) می باشد.این صفحه ها شامل تعدادی تیغه اند و همگی هم محور می باشند. بین هر مرحله ازتیغه های دستگاه چرخنده توربین ، گازداغ از یک مرحله ازتیغه های ثابت عبور می کند . برای چرخاندن صفحه چرخنده گاز باید جریان داشته ، بنابر این فشارگازداغ باید به انرژی جنبشی بیشتر تبدیل گردد .



http://www.mohandes-iran.com

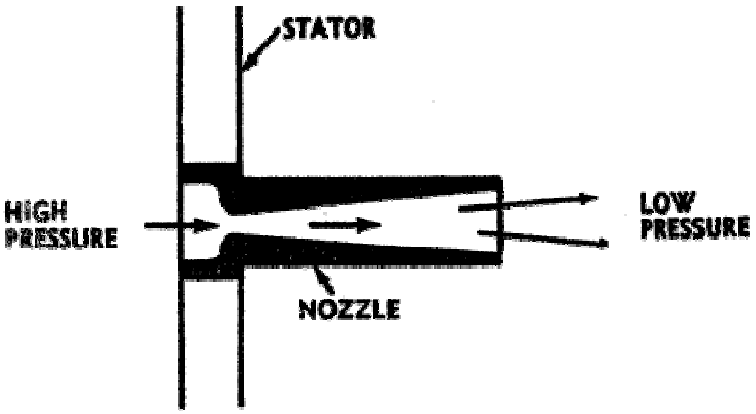
شکل زیر، تفاوت بین گاز پر فشار و گاز پر سرعت نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، گاز فشرده نیروی خود را درتمام جهات وارد می کند ولی جریان سریع گاز بیشترنیروی خودرادریک جهت بکارمی برد.از این خاصیت ، می توان جهت به حرکت درآوردن توربین استفاده کرد.

HIGH PRESSURE فشار زیاد

HIGH VELOCITY سرعت زیاد

در واقع هنگامیکه فشار به سرعت تبدیل می گردد بیشترنیروی آن در یک جهت بکارمی رود ونیروی آن درجهت دیگر کمترمی شود .هرگاه سرعت گاز زیاد شود فشارآن کم می گردد .

جهت افزایش سرعت گاز، از نازل(Nozzle) استفاده می شود. نازل، به گونه ای طراحی شده است، که سطح مقطع آن رو به افزایش است.بنابراین، انرژی فشاری در آن به انرژی جنبشی تبدیل شده و سرعت را افزایش می دهد.



http://www.mohandes-iran.com

در حال کلی به دو صورت می توان از انرژی جنبشی گاز جهت ایجاد حرکت استفاده کرد:

روش اثر ضربه ای(Impulse Effect): که در آن نازل ثابت بوده و گاز با سرعت بالا از دهانه خارج می شود و با مانعی مانند پره برخورد می کند و موجب ایجاد حرکت در جهت حرکت گاز میشود.توربین هایی که با این روش کار می کنند، توربین ضربه ای نامیده می شوند.

روش اثر عکس العملی(Reaction Effect): که در آن نازل با جسم متحرکی وصل بوده و در خلاف جهت حرکت گاز حرکت می کند.این روش در موشک، آب پاش چمن و ...مورد استفاده قرار می گیرد. توربین هایی که با این روش کار می کنند نیز توربین عکس العملی نامیده می شوند. در شکل زیر، انواع توربین نشان داده شده است:

Impulse Turbine

Reaction Turbine

توربین ضربه ای(Impulse Turbine):

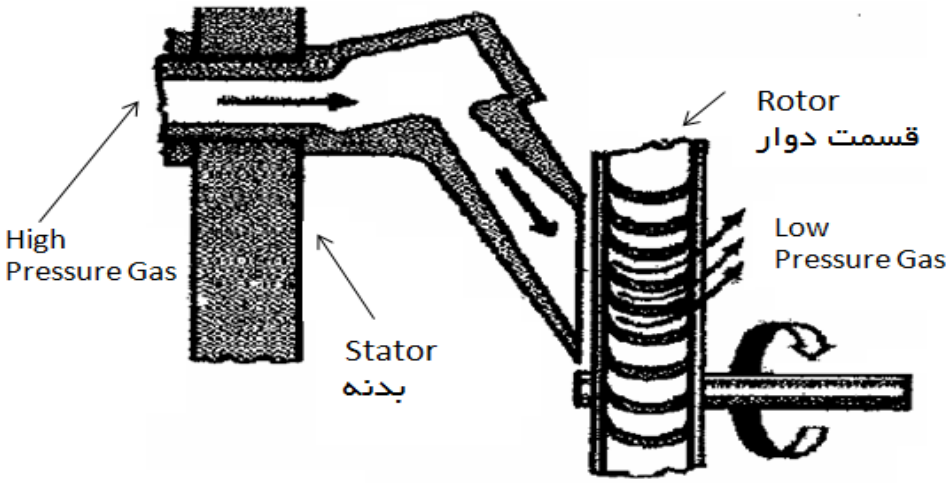
کلید فهم اینکه چگونه یک توربین عمل می کند دانستن نیروهای آئرودینامیکی است.

در مورد توربین تکانه ای تقریبا به طور منحصر به فرد این گاز های با سرعت بالا هستند که روی سطوح مقعر تیغه ها عمل می کنند.به عبارت دیگر این یک (تاثیر سطلی) است که انرژی را استخراج می کند.

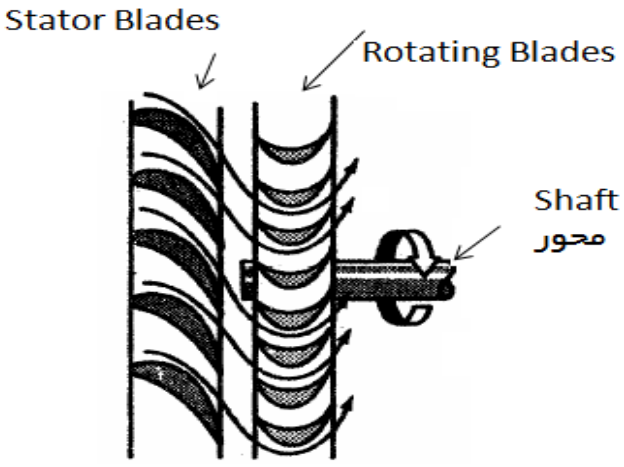
گاز به درون سطوح مقعر تیغه ها و با یک زاویه حدود ۴۵ تا ۸۵ درجه هدایت می شود.و به نسبت محور نیرو به محور منتقل می شود.

http://www.mohandes-iran.com

خاصیت جالب موتورهای تکانه ای این است که سرعت گاز پس از خروج از تیغه ها کاهش می یابد در حالیکه فشار ثابت می ماند.انرژی به دلیل تغییر سرعت گاز منتقل می شود نه فشار گاز. دراین نوع توربین ها ازخاصیت ضربه ای برای حرکت دادن تیغه ها استفاده می شود .در شکل زیر، اجزای این نوع توربین ها مشخص شده است.



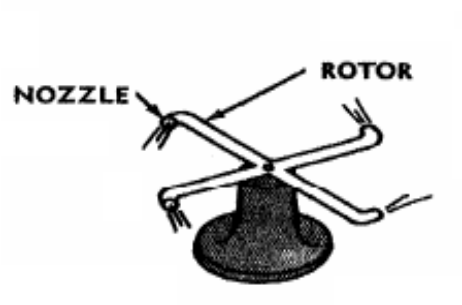
در ادامه، گاز پرسرعت خروجی از نازل با تیغه ها برخورد می کند و به آن ضربه می زند و آن را به حرکت در می آورد.به همین دلیل، این نوع توربین ها را ضربه ای می نامند. درتوربین بجای یک نازل بزرگ می توان از تعدادی از تیغه های ثابت کوچک که کار نازل را انجام می دهند استفاده کرد.این روش در شکل زیر نشان داده شده است. توربین های ضربه ای، معمولا در مواردی به کار می روند، که فشار ورودی توربین خیلی بالا باشد.



http://www.mohandes-iran.com

توربین عکس العملی(Reaction Turbine):

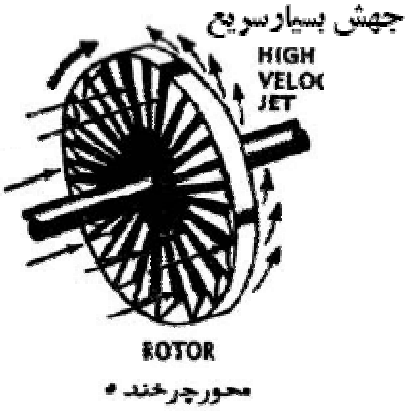
همانطور که قبلا اشاره شد، آب پاش چمن بر این اساس کار می کند.

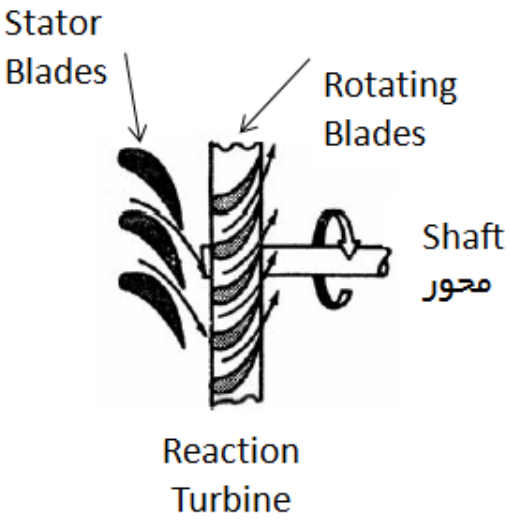


به اختلاف میان سطح مقطع تیغه ها در توربین واکنشی در مقایسه با توربین تکانه ای توجه نمایید. در توربین های واکنشی به وسیله کاهش سرعت گاز و کاهش فشار گاز انرژی جنبشی گاز به نیروی محور تبدیل می شود.دقیقا مثل با هوا پیما.هنگامی که گاز از سمت چپ تیغه وارد می شود و در طول صفحه ی تیغه حرکت می کند روی صفحه بالاتر کاهش فشار و روی صفحه پایین تر افزایش فشار خواهیم داشت.هنگامی که گاز لبه انتهایی را ترک می کند کاهش سرعت گاز ، فشار و یک زاویه رو به پایین (منظور جهت حرکت است) خواهیم داشت.که نتیجه آن یک بالا رفتن یا نیروی واکنشی خواهد بود.

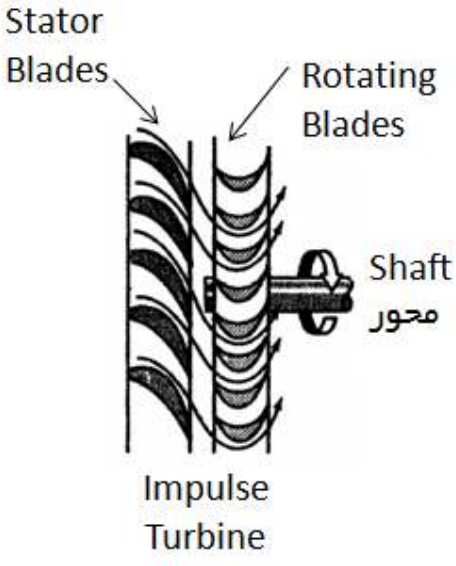
در شکل صفحه بعد، نمونه ای از یک توربین گازی عکس العملی نشان داده شده است. گاز پر فشار در بین تیغه ها منبسط شده و در اثرانبساط و افت فشار، انرژی جنبشی بیشتر می شود و درنتیجه سرعت آن افزایش می یابد. توربین هایی که بر این اساس کار می کنند، از اصل ضربه نیز استفاده می کنند. تیغه های ثابت درتوبینهای ضربه ای و عکس العملی همانند هم هستند ، اما تیغه های متحرک در این دو نوع توربین، متفاوت اند.

http://www.mohandes-iran.com

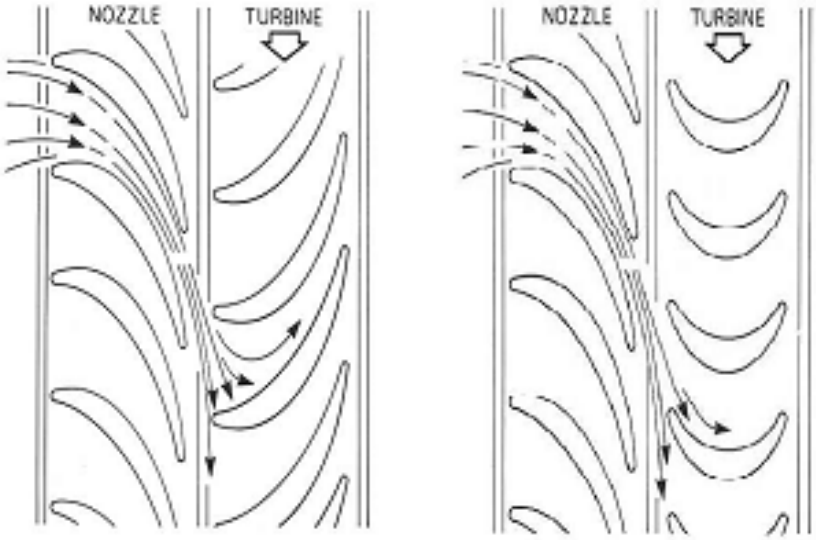


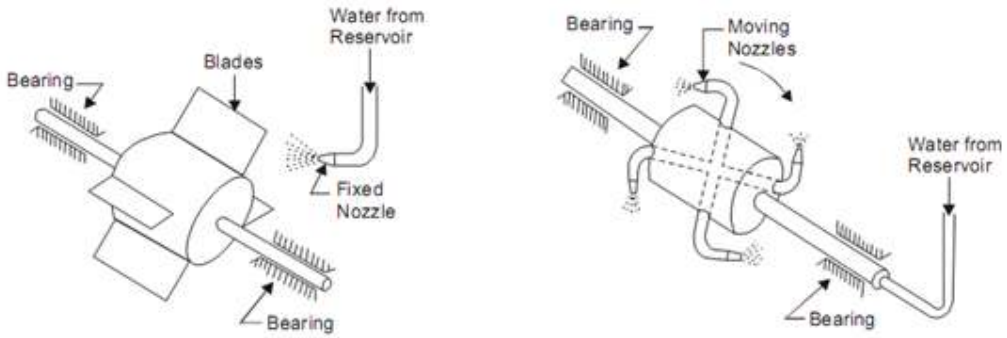


Reaction
Turbine



Impulse
Turbine





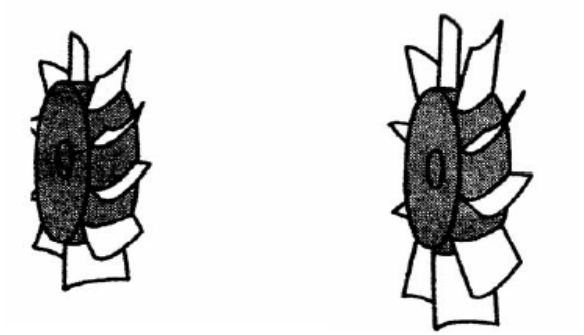
Impulse Turbine. Reaction Turbine.

شماتیکهایی از عملکردهای توربین

http://www.mohandes-iran.com

در حالت کلی، صرف نظر از نوع توربین، طراحی به گونه ای است، که گاز پس از عبور از یک سری تیغه های ثابت و متحرک، با فشار کمتر مجددا وارد یک سری دیگر از این تیغه ها می شود. در ادامه نوشته های قبل که در مورد توربین کمپرسور بیان شد چینش هایی از اجزای توربین وجود دارد که در آن یک توربین به صورت جداگانه به کمپرسور متصل می شود.این توربین را توربین کمپرسور می نامند. تفاوت عمده بین توربین کمپرسور و توربین قدرت(توربین بار) عبارت است از:

- در اغلب توربین ها، صفحات دستگاه چرخنده توربین کمپرسور از تعداد صفحات دستگاه چرخنده توربین بار بیشتر است.
- از آنجایی که درکمپرسور، هوا که فشرده می شود و حجم آن کم می شود،و در قسمت توربین فشار گاز کم شده وحجم آن زیاد می شود، پس برای اینکه گاز به خوبی با تیغه های توربین باربرخورد کند ، تیغه های توربین بار را بزرگتر از تیغه های توربین کمپرسورمی سازند.
- از آنجایی که تیغه های توربین بار بزرگتر و بلندترند، بنابراین احتمال شکستگی در آن ها بیشتر است. بنابراین تیغه های توربین بار را از آلیاژهای مقاوم تری می سازن



COMPRESSOR TURBINE

توربین کمپرسور

LOAD TURBINE

توربین بار

در واقع هدف اصلی در یک توربین گازی تبدیل انرژی نهفته در سوخت های فصیلی به انرژی مکانیکی و کار میباشد. این تبدیل در قسمتی از توربین گاز به نام توربین اتفاق می افتد در این قسمت بخش

http://www.mohandes-iran.com

اعظمی از انرژی گازهای حاصل از احتراق گرفته می شود و این انرژی به محور توربین گاز انتقال داده می شود در واقع توربین قسمتی است که بعد از محفظه احتراق قرار گرفته است و وظیفه تبدیل انرژی گرمایی گازهای خروجی از محفظه احتراق به انرژی مکانیکی و کار را بر عهده دارد اگر توربینها را از لحاظ گردش سیال در توربین طبقه بندی کنیم دو نوع توربین میتوان نام برد.توربینها با جریان گردشی و توربین ها با جریان محوری که تفاوت اصلی آنها در جهت عبور سیال از آنهاست.

حرکت گازهای خروجی عمود بر امتداد ورود گازهای داغ و در توربین های با جریان محوری، این جهت،موازی گازهای داغ ورودی می باشد .به عبارت دیگر در توربین های با جریان گردشی، جریان گازها از مرکز محور توربین به سمت بیرون و شعاعی میباشد که باعث حرکت و چرخش توربین می شود .درحالیکه در توربین های با جریان محوری، گازها در موازات محور مرکزی توربین وارد میشوند و با برخورد به پره ها باعث چرخش آنها شده و سپس بدون تغییر مسیر از توربین خارج میشوند.

توربین های با جریان گردشی:

این توربین ها در مقایسه با توربین های با جریان محوری، بسیار ساده تر و ارزان تر میباشند .این نوع توربین به جهت طراحی و ساخت، بسیار شبیه به کمپرسورهای سانتریفیوژ هستند که در بخش کمپرسورهای اینترم افزار آورده شده است .از این نوع توربین ها، معمولا در توربین های گاز کوچک که برای فشرده کردن سیالات گوناگون و یا سایر سامانه های انتقال دهنده سیالات کاربرد دارند، استفاده می شود.

توربین های با جریان محوری:

توربین های محوری از دو قسمت اصلی پر ههای ثابت و پره های متحرک تشکیل شده اند .توربین های محوری میتوانند، یک مرحله و یا چند مرحله داشته باشند .در هر مرحله از توربین، دوجزء اصلی وجود دارد که عبارتند از :ابتدا پره های ثابت وسپس پره های متحرک .در هر مرحله از توربین، گازهای داغ حاصل از احتراق پس از برخورد به پره های ثابت که به شکل نازل نیز هستند، تغییر مسیر می دهند وعلاوه بر کاهش فشار گازهای عبور و افزایش سرعت آنها، در زاویه ای مناسب به پره های روتور برخورد می کنند و باعث چرخش آن میشوند .این چرخش باعث حرکت و گردش محور توربین شده و تولید کارمیکند.

http://www.mohandes-iran.com

بنا به توضیحات قبل اساساً دونوع توربین همچون انواع کمپرسورها وجود دارد . جریان شعاعی وجریان محوری به لحاظ امکان ایجاد تنش های حرارتی ناشی ازدرجه حرارت زیاد توربینهای جریان شجاعی معمولا برای توربینهای گازی بادرجه حرارت بالا قابل استفاده نیستند . همچون کمپرسورهای جریان محوری هوای داغ فشرده درون اتاق احتراق ازیک سری مراحل توبین عبورمی کند . هر مرحله شامل یک ردیف تیغه های ثابت است که در بدنه قراردارد(نازل) و یک ردیف تیغه های متحرک که روی یک دیسک قرارگرفته اند به محض آنکه گازداغ به تیغه های ثابت برسد منبسط می شود وفشارگازآن به انرژی جنبشی تبدیل می شود ، این فرآیند کاملا برعکس فرآیند فشارافزایی است. طرح وپروفیل تیغه های ثابت ومتحرک ، دردرجه حرارت وفشارهوای ورودی توربین وتعداد مراحل آن میزان انرژی میکانیکی قابل استحصال رامشخص می کند.

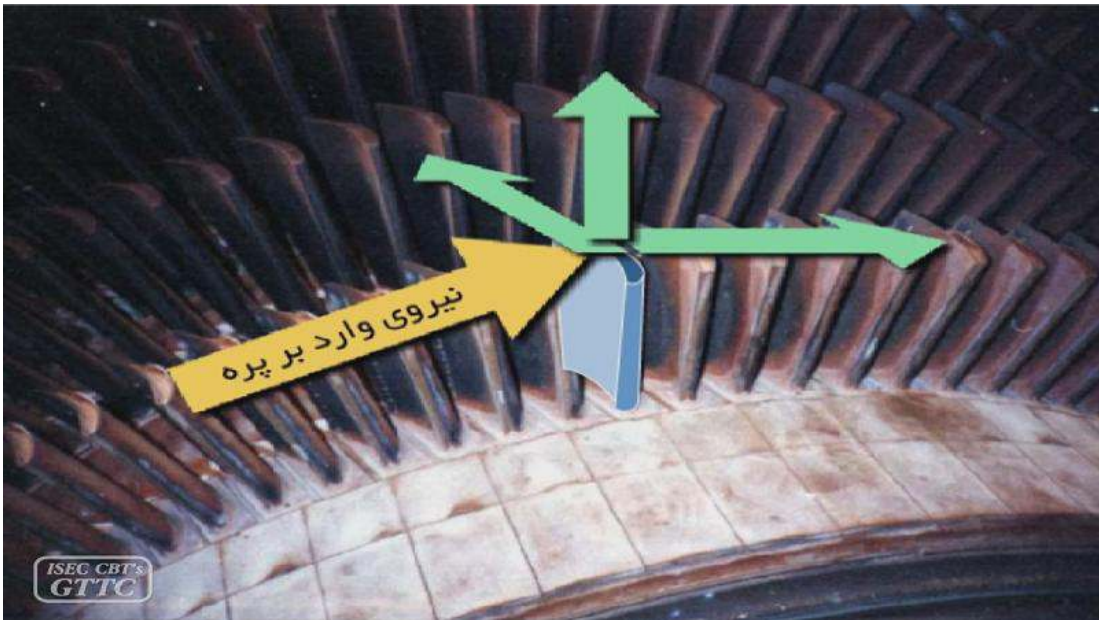
http://www.mohandes-iran.com

ساختمان توربین:

در حال حاضر قسمت توربین در توربین های گازی حداقل دارای دو مرحله و حداکثر دارای پنج مرحله هستند.که هر مرحله از یک ردیف پره ثابت و یک ردیف پره متحرک تشکیل شده است مجموع مراحل توربین تمامی انرژی فشاری و درصدی از گرمایی گازهای حاصل را به انرژی دورانی و کار تبدیل می کنند، جریان گاز داغ پرفشار وارد بخش توربین می گردد، پره های توربین به نوعی طراحی شده اند که سبب کاهش فشار و افزایش سرعت جریان گاز می گردند. گازهای داغ پس از عبور از پره های ثابت از طریق لبه حمله وارد پره های متحرک توربین شده و هم به شکل ضربه ای و هم به شکل عکس العملی به پره های متحرک نیرو وارد میکنند.

در روش ضربه ای، گازهای داغ پر سرعت از طریق لبه حمله وارد گودی پره های متحرک شده و با تغییر مسیر خود در عبور از سطح مقطع پره، تغییر اندازه حرکت پیدا می کنند و از لبه فرار از پره متحرک خارج می شوند. علت تغییر اندازه حرکت گازهای حاصل وجود نیری پره و سیال است در روش عکس العملی عبور گازهای حاصل از دو طرف یک پره و وجود انحنای بیشتر در یک طرف باعث ایجاد اختلاف سرعت در طرفین پره، در نتیجه اختلاف فشار بین دو طرف سطح مقطع پره می شود.وجد اختلاف فشار در دو طرف پره نیز باعث ایجاد نیروی عمود بر پره می شود. مجموع نیرهای ضربه ای و عکس العملی باعث بوجود آمدن یک نیروی نسبتا زیاد به پره توربین می شود. این نیرو دارای سه مولفه است که یکی از آنها مماس بر دیسک توربین و باعث دوران آن می شود یکی دیگر از ایم مولفه ها در امتداد شاع دیسک است که می بایست توسط اتصلات قوی بین پره و دیسک خنثی شود مولفه سوم این نیرو در امتداد محور توربین اثر می کند به همین خاطر در هر توربین گاز شاهد در نظر گرفتن مکانیسم جلوگیری کننده از حرکت طولی محور توربو کمپرسور هستیم.

http://www.mohandes-iran.com



گازهای داغ پس از عبور از مرحله اول و از دست دادن مقداری از انرژی فشاری و گرمایی خود وارد مراحل بعدی توربین می شوند.با توجه به برخورد مستقیم گازهای داغ با پره های توربین گاز، بخصوص پره های مرحله اول، این پره ها می بایست از آلیاژها و مواد بسیار مقاومی در مقابل درجه حرارت ساخته شده باشند . پره های ردیف اول توربین از جمله مهمترین و گرانترین قسمت هر توربین گاز حساب می آیند .جنس این پره ها از فلزات مقاوم در مقابل درجه حرارت های بالا و از آلیاژهای مقاوم در مقابل تنشهای استاتیک و دینامیک بالا انتخاب می شود .در حال حاضر بیشتر این پره ها دارای فلز پایه نیکل هستند که با عناصری شبیه کروم وکبالت و تیتانیوم طیف سوپر آلیاژ های مقاوم در مقابل حرارت های بالا را تشکیل می دهند .در عین حال روشهای ساخت و عملیات تولید و روشهای حرارتی مورد نیاز برای رسیدن به حد تحمل تنش های موجود نیز از پیچیده ترین اعمال مکانیکی روی قطعات به کار رفته در صنعت است.

http://www.mohandes-iran.com
mohandes-iran.com

بخش توربین، مشکلاتی بوجود اید . با همه این دلایل، باید بتوان به منظور کنترل توربین، از وضعیت دمای مسیر گازهای داغ اطلاع پیدا کرد . از اینرو در تمامی توربین های گاز در انتهای توربین و پس از آخرین پره های متحرک، یک سری ترموکوپل برای اندازه گیری و حفاظت توربین در نظر گرفته می شود .این ترموکوپل ها دمای گازهای داغ را اندازه گرفته و به رویت بهره بردار و به اطلاع سیستم کنترل و حفاظت می رسانند.

در صورت بروز اختلاف درجه حرارت روی این ترموکوپ ل ها عموماً اعداد خوانده شده را در روی یک نمودار دایره ای رسم کرده و با یکدیگر مقایسه می کنند .در حالت عادی کار توربین، این نمودار باید به دایره شبیه باشد . نقص در دایره، نشاندهنده گرفتگی نازل و یا افزایش پاشش سوخت، در یک و یا چند مشعل می باشد.

در بسیاری از توربین های گازی موجود برای محافظت از پره های توربین در مقابل درجه حرارت بالا از روش خنک کاری در داخل پره استفاده می شود، به این ترتیب که مقداری از هوای نسبتاً خنک خروجی کمپرسور از طریق مجراهای در نظر گرفته شده در میان محور روتور و عبور از دیسک ها به ریشه پره متحرک وارد شده و پس از عبور از امتداد پره از نوک و یا لبه فرار گازهای داغ که دارای ضخامت کمی نیز هست، خارج می شود . پره های ثابت مرحله اول نیز با ارسال هوای نسبتاً خنک خروجی کمپرسور به فضاهای در نظر گرفته شده در درون آنها نیز، خنک می شوند.

ورود هر گونه جسم خارجی به بخش توربین می تواند سبب ایجاد خسارت و شکستگی پره های توربین گردد، از اینرو سعی بر این است که در مسیر گازهای داغ ورودی به توربین، از حداقل لوازم و تجهیزات اندازه گیری استفاده شود، چراکه ممکن است با کنده شدن این تجهیزات نصب شده در مسیر گازهای داغ و ورود به

اگزوز

گازهای داغ در عبور از مراحل مختلف توربین تمامی انرژی فشاری و مقدار زیادی از انرژی حرارتی خود را از دست می دهند .توربین های گازی عموماً به شکلی طراحی می شوند که فشار گازهای داغ در خروجی توربین و پس از آخرین پره متحرک اندکی از فشار اتمسفر کمتر است .لذا برای غلبه بر فشار محیط وخروج از طریق اگزوز یک مجرای واگرا در خروجی توربین گاز، بین توربین و اگزوز، وجود دارد .در این مجرای واگرا با استفاده از سرعت سیال و تبدیل آن به فشار، بر فشار محیط غلبه کرده و از این طریق گازهای خروجی که دارای دمای نسبتاً بالایی هستند از طریق اگزوز به اتمسفر اطراف فرستاده می شود.

از آنجایی که توربینهای گازی یکی از اجزای کاملا پیشرفته هستند و روز به روز در حال پیشرفتند و از آنجایی که این توربینها دارای اجزای زیادی هستند، در این فصل سعی کردم فقط اجزا و سیستمهای اصلی توربینها را در حد امکان تشریح کنم .

http://www.mohandes-iran.com

فصل سوم

عملکرد ترمودینامیکی توربین گازی

Theromodynamic performance of Gas Turbine

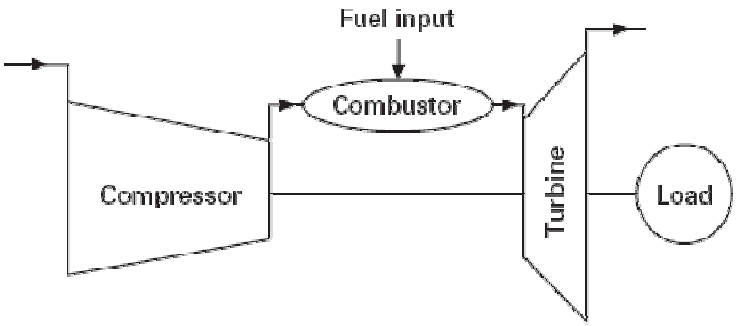
http://www.mohandes-iran.com

اگر بخواهیم به صورت تئوری و با توجه به تعاریف فصول گذشته عملکرد توربین گازی را تشریح کنیم ،باید اینگونه بیان کنیم که با منبسط شدن گازهای حاصل از احتراق (که دارای دما و فشار بالایی می باشند) در چندین طبقه از پره های ثابت و متحرک قدرت در توربین گاز تولید می شود. برای تولید بالا جهت محفظه احتراق (حدود ۴ تا ۱۳ اتمسفر) از کمپرسورهای محوری با چندین طبقه استفاده می شود. در هر طبقه بر میزان فشار هوای مکیده شده توسط کمپرسور افزوده می شود. کمپرسور توسط توربین به گردش در می آید به همین منظور محور کمپرسور و توربین به هم متصل است. اگر همه چیز را ایده آل فرض کنیم یعنی اصطکاک و تلفات ترمودینامیکی سیال صفحه فرض شوند. همه فرآیندها در تمام طبقات کمپرسور و توربین ایده آل است و افت فشار در محفظه احتراق نیز صفر است. بعد از راه اندازی توربین گاز اگر کل سیستم را به حالت خود رها کنیم (بدون اینکه سوختی مصرف کنیم) قاعدتاً باید قدرت تولید شده در توربین مساوی قدرت مصرف شده در کمپرسور باشد. اما این از لحاظ علمی غیرممکن است. در توربین گاز حدود $\frac{2}{3}$ قدرت تولید شده در توربین صرف به گردش آوردن کمپرسور شده و $\frac{1}{3}$ آن به عنوان کار خروجی جهت تولید برق (یا هر مصرف دیگر) مصرف می شود.

بنابراین لازم است که قدرت تولیدی در توربین بیشتر از قدرت مصرفی در کمپرسور باشد. برای این منظور می توان با اضافه کردن حجم سیال عامل در فشار ثابت یا افزایش فشار آن در حجم ثابت قدرت تولیدی توربین را افزایش داد. هر یک از دو روش فوق را می توان با بالا بردن دمای سیال عامل پس از متراکم ساختن آن به کار برد. برای افزایش دمای سیال عامل یک محفظه احتراق لازم است تا با احتراق سوخت دمای هوا بالا رود. به این ترتیب یک سیکل ساده توربین گاز از یک کمپرسور، محفظه احتراق و یک توربین تولید کننده قدرت تشکیل شده است.

http://www.mohandes-iran.com

شرط اساسی جهت تولید انرژی در یک توربین این است که فشار ورودی آن(inlet pressure) از فشار خروجی آن (outlet pressure) بالاتر باشد. جهت افزایش چنین فشاری در توربین به طور عمده از کمپرسور استفاده می شود. بنابراین در توربین ، کمپرسور قبل از توربین قرار داده می شود. شکل زیر ، نمونه ای از توربین تک محوری را نشان می دهد که در آن محور کمپرسور و توربین به هم متصل است.



Schematic layout of a single-shaft gas turbine.

اگر سیال مورد استفاده در توربین تنها هوا باشد در اینصورت سیال خروجی از کمپرسور در توربین منبسط شده و بدلیل اتلاف انرژی در کمپرسور وتوربین، انرژی خروجی از توربین کمتر از انرژی مصرفی در کمپرسور خواهد بود و در اینصورت سیستم متوقف خواهد شد.اگر مقداری گاز به عنوان سوخت جهت جبران اتلاف انرژی به هوای مورد استفاده در توربین اضافه کنیم در این صورت پس از سوختن گاز، سیستم به کار خود ادامه می دهد ولی هیچ انرژی اضافی تولید نخواهد کرد. جهت تولید انرژی در توربین گازی می بایست مقدار بیشتری گاز به آن اضافه کرد.

این انرژی در محفظه احتراق(combustion chamber or combustor) که بین کمپرسور و توربین قرار دارد سوزانده می شود.

انرژی خروجی از توربین گازی به بازده اجزای زیر بستگی دارد:

کمپرسور ،محفظه احتراق ،توربین

http://www.mohandes-iran.com

هرچه این اجزا بازده بالاتری داشته باشند، توربین بازده گرمایی بالاتری داشته و انرژی بالاتری تولید خواهد کرد..توربین های گازی در طول ۵۰ سال گذشته کاملا توسعه یافته اند و امروزه توربین های پیشرفته ای که طی فرآیندهای پلی تروپیک عمل می کنند بازده ای بالاتر از ٪۹۰ دارند! در یک دسته بندی خاص می توان توربین های گازی را در دو دسته زیر طبقه بندی کرد:

توربین گازی با چرخه ساده(simple cycle gas turbine): که دارای اجزای زیر است :

کمپرسور، محفظه، احتراق توربین.

توربین گازی با چرخه پیچیده(complex cycle gas turbine): که علاوه بر اجزای فوق دارای اجزای زیر نیز است:

۱. سرد کننده میانی(intercoolers) جهت کاهش انرژی مصرفی در هنگام فشرده سازی در کمپرسور
۲. دوباره گرم کن(re-heaters) جهت افزایش توان خروجی توربین
۳. مبدل گرمایی(heat exchangers) جهت تبادل گرمای توربین با محیط و ثابت نگه داشتن دمای سیستم

چینش اجزای توربین های گازی(gas turbine layouts):

در طی سال های اخیر چینش های مختلفی برای اجزای توربین های گازی بدست آمده است.برخی از این چینش ها برای مقاصدی مانند تولید نیرو مناسب اند که در آن سرعت قسمت بار(load) (که دراینجا ژنراتوراست) ثابت است ، مناسب اند. برخی دیگر نیز در مواردی که در آن سرعت قسمت بار(پمپ و یاکمپرسور) متغیر است کاربرد دارند. در حالت کلی چینش اجزای توربین به صورت های زیر است:

۱-توربین گازی تک محوری

۲-توربین گازی دو محوری به همراه یک توربین قدرت

۳-توربین گازی سه محوری به همراه یک توربین قدرت

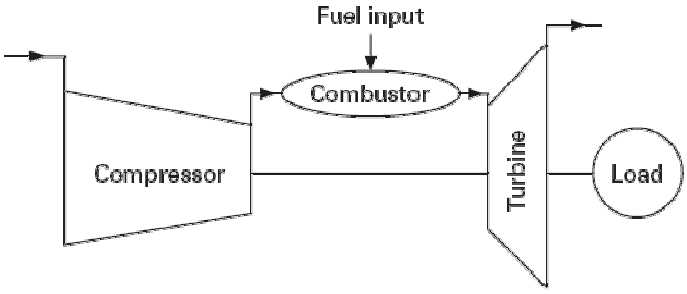
۴-توربین گازی دو محوری

http://www.mohandes-iran.com

در ادامه هریک از چینش های فوق بررسی می شوند و مزایا و معایب آن ها بیان می شود.

توربین گازی تک محوری(single-shaft gas turbine):

یک توربین گازی تک محوری همانطور که در شکل زیر نیز دیده می شود دارای یک کمپرسور، یک محفظه احتراق و یک توربین است.



Schematic layout of a single-shaft gas turbine.

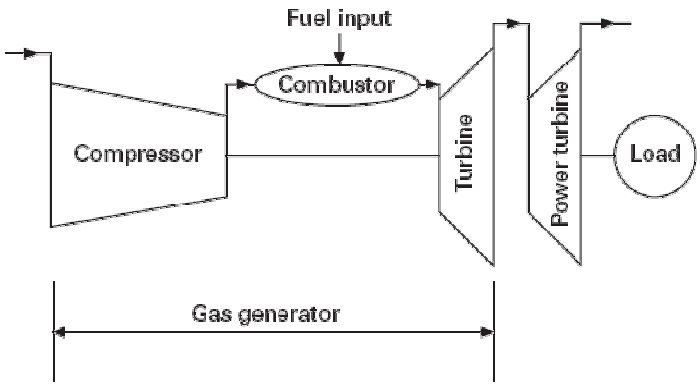
کمپرسور هوا را فشرده کرده و فشار آن را افزایش می دهد. در ادامه این هوای فشرده وارد یک محفظه احتراق می شود و درآنجا توسط سوختی که در حال سوختن است گرم می شود.در ادامه گاز پرفشار و داغ در توربین منبسط می شود و مقداری انرژی را به توربین منتقل می کند.قسمتی از انرژی خروجی توربین توسط محوری که توربین را به کمپرسور متصل می کند ، به کمپرسور منتقل می شود و مجددا در فرآیند فشرده سازی هوا مورد استفاده قرار می گیرد.قسمتی از انرژی خروجی توربین نیز که باقی می ماند جهت چرخاندن بار(مانند ژنراتور) مورد استفاده قرار می گیرد. توربین های گازی تک محوری بیشتر برای فرآیند هایی مناسب اند که در آن سرعت ثابت است(مانند تولید الکتریسیته توسط ژنراتور). توربین های گازی تک محوری دارای این مزیت اند که به دلیل استفاده زیاد از انرژی در کمپرسور از افزایش بیش از حد سرعت و در نتیجه جدا شدن ژنراتور از محور جلوگیری می کنند.

http://www.mohandes-iran.com

توربین گازی دو محوری به همراه یک توربین قدرت

(two-shaft gas turbine with a power turbine):

فرایند انبساط در توربین تک محوری(شکل قبل) را می توان به صورت مجزا به دو توربین تخصیص داد. به گونه ای که یک توربین را جهت چرخاندن کمپرسور و دیگری جهت به حرکت درآوردن بار به کاربرد.در اینحالت توربین مستقلی را که جهت به حرکت درآوردن ژنراتور استفاده می شود را توربین قدرت(power turbine) می گویند.اجزای دیگر توربین یعنی کمپرسور ،محفظه احتراق و توربین با فشار بالا نیز ژنراتور گاز(gas generator) نامیده می شوند. شکل روبرو نمونه ای از توربین گازی دو محوری به همراه یک توربین قدرت را نشان می دهد.



Schematic layout of a two-shaft gas turbine with a power turbine.

وظیفه ژنراتور گاز تولید گاز با فشار و دمای بالا جهت استفاده در توربین قدرت است.در شرایطی که تغییر قابل توجهی در سرعت با توان مورد نیاز وجود دارد (زمانی که بار پمپ یا کمپرسور است) می توان از توربین گازی دو محوری استفاده کرد. در اینحالت یک محور کمپرسور و توربین پرفشار را به هم وصل می کند و دیگری جهت اتصال توربین کم فشار به بار به کار می رود.

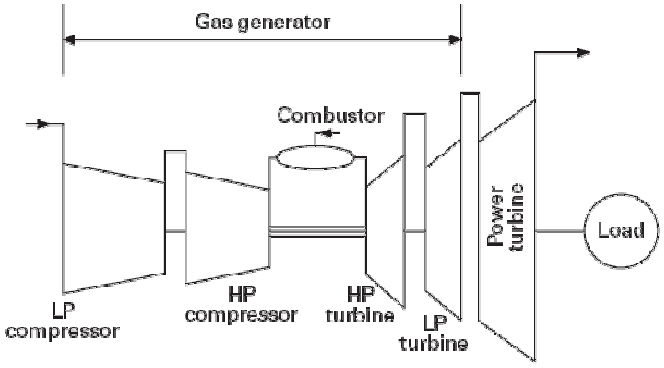
http://www.mohandes-iran.com

ممکن است شرایط عملیاتی به گونه ای باشد که بار در سرعت پایینی بچرخد اما کمپرسور نیاز به جذب توان بالایی داشته باشد.در چنین حالتی توربین قدرت می تواند با سرعتی مساوی با سرعت بار بچرخد و ژنراتورگاز نیز با حداکثر سرعت به حرکت درآید. مزیت اصلی این نوع توربین ها، نیاز داشتن به توان آغازین کم است، به گونه ای که تنها ژنراتور گاز در هنگام شروع(start) نیاز به چرخاندن دارد و توربین قدرت نیاز به چرخاندن ندارد.همچنین این نوع توربین ها از نظر عملکرد طراحی بهتراند. عیب اصلی این توربین ها نیز، افزایش بیش از حد سرعت توربین قدرت است، در صورتی قسمت ژنراتور به خوبی به محور متصل نباشد.

توربین گازی سه محوری به همراه یک توربین قدرت

(three-shaft gas turbine with a power turbine):

همانطور که در بخش قبل بررسی شد، ژنراتور گاز((gas generator (GG را می توان جداگانه به کار برد.زمانی که این کار صورت گرفت، توربین پرفشار در بخش GG ، کمپرسور پرفشار در آن بخش را می چرخاند و می توان کمپرسور کم فشاری قرار داد که توربین کم فشار در بخش GG آن را بچرخاند. با اینحال هیچ ارتباط مکانیکی بین محور های مربوط به قسمت کم فشار و پرفشار وجود ندارد.این روش اصول طراحی توربین های گازی دو محوری به همراه یک توربین قدرت را تشکیل می دهد.



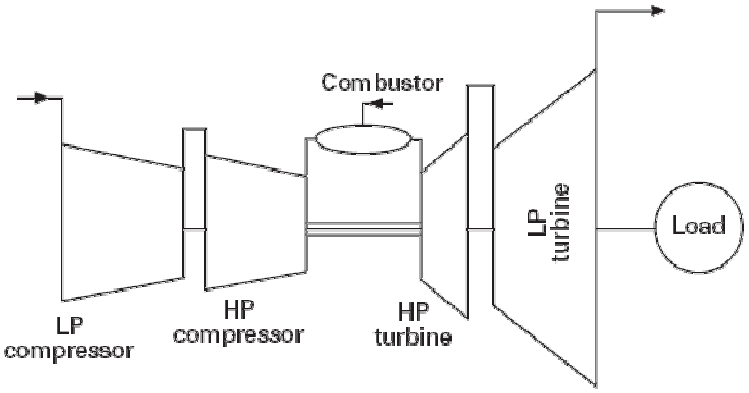
Schematic layout of a three-shaft gas turbine with a power turbine.

http://www.mohandes-iran.com

شکل صفحه قبل نمونه ای از توربین گازی سه محوری به همراه یک توربین قدرت را نشان می دهد.همانطور که در این شکل دیده می شود، توربین قدرت همچنان از نظر مکانیکی از GGمستقل است. با چنین چینشی می توان به نسبت های فشاری و بازده گرمایی بالاتری دست یافت.از آنجایی که در توربین های گازی سه محوری در هنگام شروع ،در قسمت GG تنها نیاز به چرخاندن کمپرسور پرفشار و توربین ها است ، لذا نیاز به توان آغازین کمتری دارند. سوخت موتورهایی که دارای چنین چینشی هستند به طورعمده توسط گازهای مورد استفاده در صنایع هوایی تامین می شود.

توربین گازی دو محوری(two-shaft gas turbine):

همانطور که در دو بخش قبل بررسی شد، در صورت استفاده از چینش های توربین گازی دو محوری به همراه یک توربین قدرت و توربین گازی سه محوری به همراه یک توربین قدرت، در صورتی که ژنراتور به خوبی به محور متصل نباشد ، سرعت توربین قدرت شدیدا افزایش می یابد.در توربین گازی دومحوری جهت مقابله با این مشکل، همانطورکه در شکل زیر دیده می شود، توربین قدرت و توربین کم فشار یکی هستند، به گونه ای که محورتوربین کم فشار که به بارمتصل است، به توربین پر فشار نیز متصل شده است.این نوع توربین ها همچنان نسبت به توربین های تک محوری به انرژی آغازین کمتری نیاز دارند.

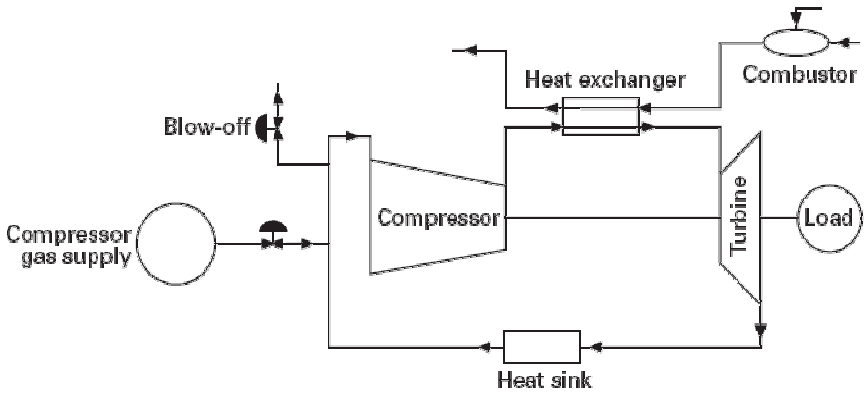


Schematic layout of a two-shaft gas turbine.

http://www.mohandes-iran.com

توربین های گازی با چرخه بسته (closed cycle gas turbine):

یکی از نقاط ضعف توربین های گازی، عملکرد آن ها در هنگامی است که توان عملیاتی کم باشد. درواقع در این حالت به دلیل عملکرد توربین در توان عملیاتی پایین، دمای ورودی توربین و نسبت فشاری کاهش می یابد که این موضوع منجر به کاهش بازده حرارتی توربین می شود. برخلاف توربین های گازی با چرخه باز که تا اینجا بحث شد، در توربین های گازی با چرخه بسته ، فشار سیستم قابلیت تغییر دارد به گونه ای که می تواند توان خروجی از توربین گازی را تغییر دهد.به عبارت دیگر چرخه به گونه ای طراحی می شود که بتواند دمای ورودی توربین و نسبت فشاری را ثابت نگه دارد و در نتیجه مانع از کاهش بازده حرارتی توربین شود. شکل زیر نمونه ای از توربین های گازی با چرخه بسته را نشان می دهد.



Schematic representation of a closed cycle gas turbine.

در این چرخه می توان با بازکردن شیر فوران گیر(blow-off valve) و کاهش دبی جرمی ورودی به موتور ، فشار عملیاتی را کاهش داد.این کار منجر به کاهش توان خروجی توربین می شود. مبدل گرمایی(heat exchanger) نیز گرمای تولید شده در محفظه احتراق را جذب کرده و آن را به توربین گازی منتقل می کند.

http://www.mohandes-iran.com

از مزایای توربین های گازی با چرخه بسته می توان به موارد زیر اشاره کرد:

از نظر عملکرد طراحی بهترند. می توان از گازهایی به جز هوا مانند هلیوم در این چرخه ها استفاده کرد. استفاده از گاز هلیوم در این چرخه به دلیل دارا بودن ضریب انتقال حرارت بالاتر مناسب تر است.در صورت استفاده از این گاز، به موتور با اندازه کوچکتر نیاز است و می توان بازده گرمایی را افزایش داد. به دلیل اینکه در این چرخه ها سیال در چرخه ثابت می ماند ، این توربین ها را می توان در فرایند تولید انرژی در نیروگاه های اتمی به کار برد. از معایب این چرخه ها نیز داشتن بازده گرمایی پایین تر نسبت به چرخه های باز است. دلیل افت بازده در این چرخه ها نیز تاثیر مبدل گرمایی است.در واقع مبدل گرمایی نمی تواند تمامی گرمای تولید شده در محفظه احتراق را به توربین گازی منتقل کند. جهت بهبود فرایند انتقال حرارت توسط مبدل گرمایی در این توربین ها می توان فشار عملیاتی را افزایش داد.

انواع سیستم:

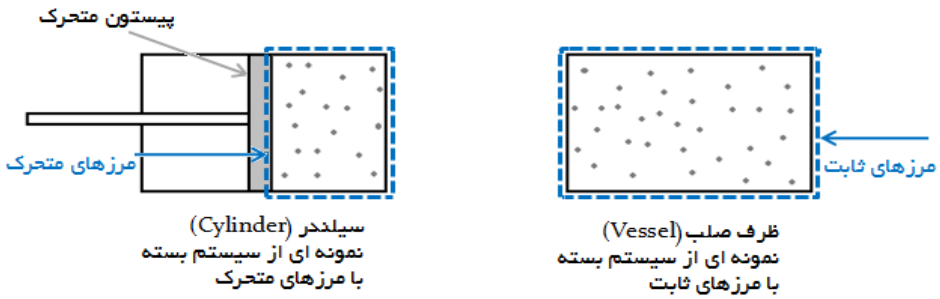
سیستم ترمودینامیکی(system) :

سیستمی ترمودینامیکی بخشی از فضا است که توسط یک حجم کنترلی مشخص می شود. مرز های این حجم کنترلی می تواند ثابت یا متحرک باشند. سیستم ترمودینامیکی می تواند به صورت های زیر باشد:

سیستم ایزوله(Isolation system): به هیچ وجه با محیط پیرامون خود تبادل انرژی(کار یا گرما) و ماده ندارد.

سیستم باز (Open sysrem): می تواند با محیط پیرامون خود تبادل انرژی و ماده داشته باشد

سیستم بسته (Close system):می تواند با محیط پیرامون خود تبادل انرژی داشته باشد ولی تبادل ماده ندارد. شکل زیر نمونه هایی از سیستم بسته را نشان می دهد که با مقداری گاز پرشده اند.



http://www.mohandes-iran.com

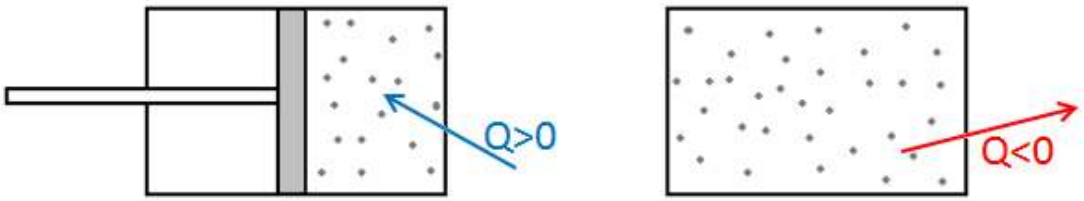
محیط(surrounding) :

به هرچیز که خارج از سیستم قرار می گیرد، محیط می گوییم.

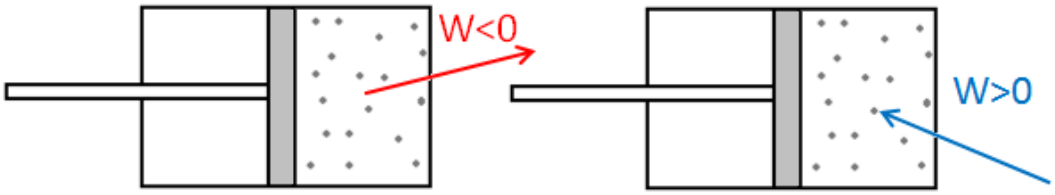
تعاریف انرژی:

انرژی(E):از مفاهیم بنیادی است و به صورت توانایی انجام کار تعریف می شود.در یک سیستم بسته، انرژی به یکی از صورت های زیر بین سیستم و محیط مبادله می شود:

گرما(Q): نوعی انرژی است که به دلیل اختلاف دما بین سیستم و محیط مبادله می شود. اگر سیستمی گرما بگیرد علامت گرما مثبت است($Q>0$) و در صورت از دست داده گرما علامت آن منفی است($Q<0$).



کار(W): نوعی انرژی است که به دلیل جابجایی مرزهای سیستم ، بین سیستم و محیط مبادله می شود. اگر سیستمی منبسط شود، کار از دست داده و علامت کار منفی است($W<0$) و در صورت منقبض شدن کار گرفته است و علامت کار مثبت خواهد بود($W>0$).



http://www.mohandes-iran.com

انرژی درونی(U):

این انرژی ، مجموع انرژی های ذرات سازنده یک جسم است. انرژی درونی به طور عمده مجموع انرژی های زیر است:

انرژی پتانسیل بین مولکولی که از نیروهای بین مولکول ها نتیجه می شود. انرژی جنبشی مولکولی که از سرعت انتقال تک تک مولکولها نتیجه می شود. برای یک گاز ایده آل می توان نشان داد که انرژی درونی تنها تابع دماست و در صورت ثابت ماندن دما، انرژی درونی هم ثابت اس

قانون اول ترمودینامیک:

این قانون که به قانون پایستگی انرژی نیز معروف است بیان می کند که مقدار کلی انرژی ثابت است و تنها از شکلی به شکل دیگر تبدیل می شود.اگر این قانون را برای یک سیتم بسته بنویسیم خواهیم داشت: $\Delta U=W+Q$ در واقع در یک سیستم بسته تبادل کار و گرما بین سیستم و محیط منجر به تغییر انرژی درونی سیستم می شود. با در نظر گرفتن سیستم شامل یک ماشین و گاز ، یک بخش از ماشین که محتوی گاز می باشد این قانون به صورت زیر نوشته می شود

$$Q - W_T = \Delta U + \Delta P + \Delta U$$

$\Delta U > 0$ انرژی درونی سیستم افزایش یافته است.

$\Delta U < 0$ انرژی درونی سیستم کاهش یافته است.

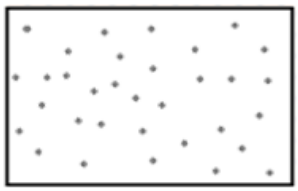
انواع فرآیند

فرآیند: به عملی گفته می شود که سیستم را از حالت اولیه(فشار، حجم و دمای اولیه) به حالت ثانویه (فشار، حجم و دمای ثانویه) منتقل می کند. برخی از فرایندهای مهم به صورت زیر ند:

http://www.mohandes-iran.com

فرآیندحجم ثابت (V=const) : Isometric process

فرآیندی است که در آن حجم ثابت می ماند. فرآیندی که در یک ظرف صلب صورت می گیرد به صورت حجم ثابت است. بدیهی است که در این نوع فرآیند انتقال انرژی می تواند تنها از طریق انتقال حرارت صورت گیرد.

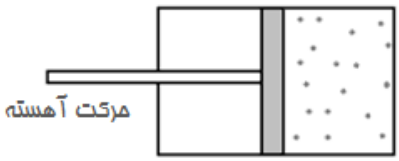


$$W=0\,,\ \Delta U=\cancel{W}^{0}+Q=Q \rightarrow \Delta U=Q$$

فرآیندفشار ثابت (P=const) : Isobar process

فرآیندی است که در آن فشار ثابت می ماند.فرآیندی که در یک ظرف سیلندر صورت می گیرد ، در صورتی که به آرامی صورت گیرد به صورت فشار ثابت است.

در این نوع فرآیند انتقال انرژی می تواند هم از طریق کار و هم از طریق انتقال حرارت صورت گیرد.



فرآیند هم دما (T=const) : process Isothermal

فرآیندی است که در آن دما در طول فرآیندثابت می ماند. برای یک گاز ایده آل در این فرآیند:

فرآیند آدیاباتیک: Adiabatic process

$$T=cons \rightarrow \Delta U=0 \quad ,\ \Delta U=W+Q \rightarrow Q=-W$$

فرآیندی است که در آن انتقال حرارت صورت نمی گیرد(Q=0).فرآیندی که در یک ظرف سیلندر صورت می گیرد ، در صورتی که آنقدر سریع انجام گیرد که فرصت تبادل حرارت با محیط وجود نداشته باشد، آدیاباتیک است. بدیهی است که در این نوع فرآیند انتقال انرژی می تواند تنها از طریق کار صورت گیرد برای چنین فرایندی داریم:

$$PV^{\gamma} = const \ , \gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$Q=0\,,\ \Delta U=W+\cancel{Q}^{0}=W \ ,\ \Delta U=W$$

http://www.mohandes-iran.com

C_P: ظرفیت گرمایی در فشار ثابت: میزان گرمایی است که باید در فشار ثابت به یک مول از گاز داده شود تا دمای آن یک درجه کلوین افزایش یابد.واحد آن ، J/k است.

C_V:ظرفیت گرمایی در حجم ثابت: میزان گرمایی است که باید در حجم ثابت به یک مول از گاز داده شود تا دمای آن یک درجه کلوین افزایش یابد.واحد آن نیز J/k است.

سیکل ها Cycles :

چرخه یا سیکل به مجموعه ای از فرآیندگفته می شود که روی یک سیستم بسته کار می کند.سیستمی که حالت اولیه آن معلوم است و از چند تغییر حالت مختلف یا فرآیندهای مختلف گذشته و در نهایت به حالت اولیه خود بر می گردد یک چرخه را طی کرده است.

انواع سیکل :

سیکل مکانیکیMechanical cycle : در سیکل مکانیکی خواص سیال فعال تغییر می کند. مانند چرخه موتورهای بنزینی و دیزلی و توربین های گاز .

سیکل ترمودینامیکیThermodynamcs sycle: در سیکل ترمودینامیکی خواص سیال فعال ثابت می ماند. مانند چرخه توربین های بخاردر ادامه برخی از سیکل های متداول در توربین ها، بررسی می شوند. نام برخی از سیکلهای معروف به صورت جدول زیر بعد است: (چرخه همان سیکل است)

نام چرخه	نوع چرخه
کارنو	چرخه موتورهای بنزینی
دیزل	چرخه موتورهای دیزل
رانکین	چرخه توربین های بخار
برایتون	چرخه توربین های گازی
استرلینگ	چرخه موتورهای احتراقی
اریکسون	چرخه موتورهای احتراقی

http://www.mohandes-iran.com

ماشین گرمایی Heat Engine :

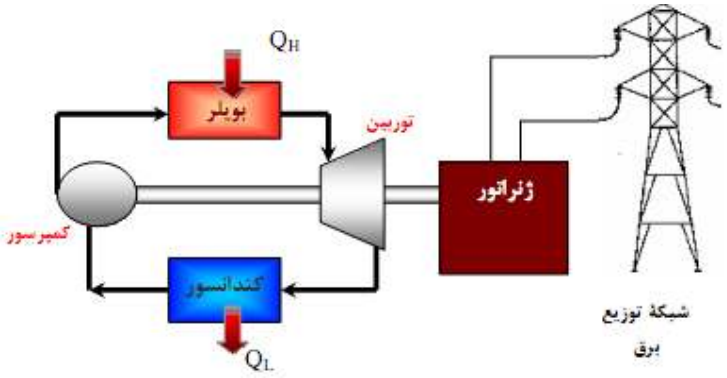
ماشین گرمایی:

به ماشینی گفته می شود که یک چرخه را طی می کند و انرژی گرمایی را از منبع گرم با دمای بالا (T_H) می گیرد. مقداری از این انرژی را به کار تبدیل می کند و مقداری را به صورت انرژی گرمایی به منبع با دمای سرد (T_C) می دهد.

به عبارتی دیگر به متور یا دستگاهی گفته می شود که انرژی حرارتی حاصل از احتراق ناشی از سوخت یا منبع گرما را میگیرد و به کار مکانیکی تبدیل میکند.

قانون اول ترمودینامیک برای یک چرخه به صورت روبروست: $Q_H = W + Q_C$

شکل زیر نمونه ای از ماشین گرمایی بخار را نشان می دهد مانند یک نیروگاه بخار



متورهای حرارتی به دو دسته تقسیم میشوند:

۱)تولید کننده توان(انرژی):

الف)متورهای درونسوز احتراق داخلی Internal combustion engine (ICE)

- گردشی یا دورانی←توربین گاز(سیکل باز)
- متورهای رفت و برگشتی(پیستونی)محفظه احتراق

http://www.mohandes-iran.com

ب)متورهای برون سوز(احتراق خارجی) External Combustion Engine (ECE)

- دورانی(توربین بخار)←توربین گاز(سیکل بسته)
- رفت و برگشتی(کتری روی آتش)

۲)جذب کننده توان(انرژی)

- کمپرسورهای هوایی
- پمپ های حرارتی یا یخچال

متورهای برونسوز: احتراق سوخت در خارج ازمحفظه آن صورت میگیرد.بطوری که حرارت ناشی از احتراق جهت ایجاد بخار برای جابجایی پیستون در سیلندر بکار برده میشود

متورهای درونسوز: احتراق سوخت همراه با اکسیژن درون محفظه احتراق رخ می دهد

احتراق ایده آل Ideal combustion :

$$\mathbf{Fuel + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O}$$

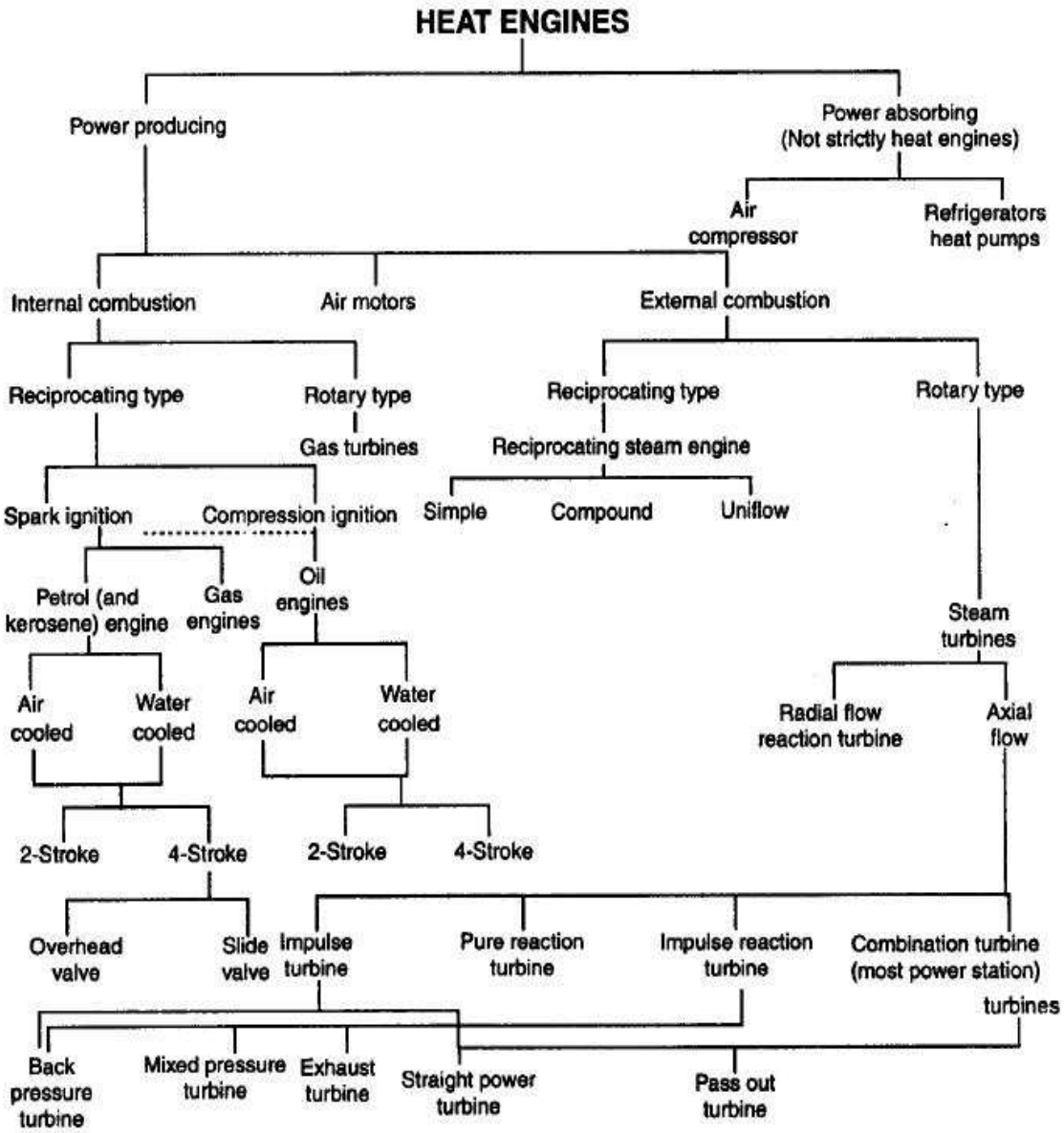
احتراق غیر ایذه آل non-ideal combustion: به احتراقی غیر ایده آل میگویند که الارقم آب و دی اکسید کربن در خروجی دارای مقادیر زیادی ($\mathbf{NO_X}$, $\mathbf{CO}$, $\mathbf{O_3}$)

بازده ماشین گرمایی(η_{th}):

بازده ماشین گرمایی به صورت نسبت انرژی مفید (که برابر با کار(W) انجام شده است) به کل انرژی دریافتی(Q_H) تعریف می شود.

$$\eta_{th} = \frac{\text{انرژی مفید}}{\text{کل انرژی دریافتی}} = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

http://www.mohandes-iran.com



Classification of heat engines.

http://www.mohandes-iran.com

قانون دوم ترمودینامیک:

این قانون برخلاف قانون اول بیان های مختلفی دارد. بر اساس بیان ماشین گرمایی این قانون نمی توان یک ماشین گرمایی ساخت که یک چرخه را طی کند و همه ی گرمای دریافتی(Q_H)را به کار(W) تبدیل کند.به عبارتی دیگر همواره مقداری گرمای اتلافی(Q_C) وجود خواهد داشت.

منبع حرارتی: جسم یا سیستمی است که می توان از ان مقدار متناهی گرما گرفت یا بـه ان داد بدون آنکه دمای آن تغییر کند. مانند جو یا دریاچه و نظایر آن. منبع حرارتی یک سیستم ایده آل و فرضی است یا سیستمی است با جرم بسیار بزرگ است بطوریکه:

$Q = mC_p(T_2 - T_1)$ گرفته شده از منبع با اختلاف دمای ناچیز مقدار متناهی می شود.

در مورد نیروگاه دو منبع حرارتی در تبادل حرارتی با سیستم هستند یکی کوره یا شعله در تماس با دیگ بخار دومی آب خنک کن کندانسور می باشد که البته سیال گرم کننده (دود) و سـیال سـرد کننده (آب خنک کن) در تماس غیر مستقیم با بخار آب تغییر دما می دهند یعنی دود سرد شده و از دودکش خارج و آب گرم شده و از کندانسور خارج می شود ولی بهرحـال منبـع حرارتـی حالـت ایده‌آل و حدی است که برای بیان قانون دوم ترمودینامیک از آن استفاده می کنیم و بعداً این قانون را به منبع حرارتی حقیقی تعمیم می دهیم.

حداکثر بازده ماشین گرمایی($\eta_{th,max}$):

می توان نشان داد که حداکثر بازدهی که یک ماشین گرمایی می تواند داشته باشد از رابطه زیر بدست می آید:

$$\eta_{th,max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

شرایط ترمودینامیکی لازم جهت طراحی ماشین گرمایی:

بر اساس مطالبی که تا اینجا بیان شد ساخت یک ماشین گرمایی تنها در صورتی که شرایط زیر را داشته باشد:

قانون اول ترمودینامیک را نقض نکند. یعنی رابطه $Q_H = W + Q_C$ (که همه عبارات در آن مقادیری مثبت هستند) برای آن برقرار باشد.

بازده آن کمتر از بازده حداکثر باشد.یعنی :

$$\eta_{th} < \eta_{th,max} \rightarrow 1 - \frac{Q_C}{Q_H} < 1 - \frac{T_C}{T_H} \rightarrow \frac{Q_C}{Q_H} > \frac{T_C}{T_H}$$

http://www.mohandes-iran.com

برای فهم بشتر در مورد گفته های گذشته ام یک مثال میزنم:

مخترعی ادعا می کند که یک ماشین گرمایی طراحی کرده است که می تواند پس از طی یک چرخه، kj ۳۰۰۰ گرما را از منبعی با دمای ۸۰۰ درجه کلوین دریافت کرده و ضمن انجام kj ۲۰۰۰ کار، kj ۱۰۰۰ گرما به منبع سرد با دمای ۳۰۰ درجه کلوین منتقل کند. درستی این ادعا را بررسی کنید.

حل) ابتدا امکان انجام این چرخه را با قانون اول ترمودینامیک بررسی می کنیم:

$$Q_H = Q_C + W \rightarrow 3000 = 1000 + 2000 \rightarrow 3000 = 3000$$

که قانون اول ترمودینامیک برقرار است.

حال امکان انجام این چرخه را بر اساس بررسی بازده ماشین گرمایی به صورت زیر بررسی می کنیم:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H} = \frac{2000}{3000} = 0.666 \rightarrow \eta_{th} = 66.6\%$$

$$\eta_{th,max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{300}{800} = 0.625 \rightarrow \eta_{th,max} = 62.5\%$$

از آنجایی که بازده این ماشین گرمایی بیشتر از حداکثر بازده ممکن است، پس امکان انجام این چرخه وجود ندارد!

سیکل رانکین Rankine Cycle :

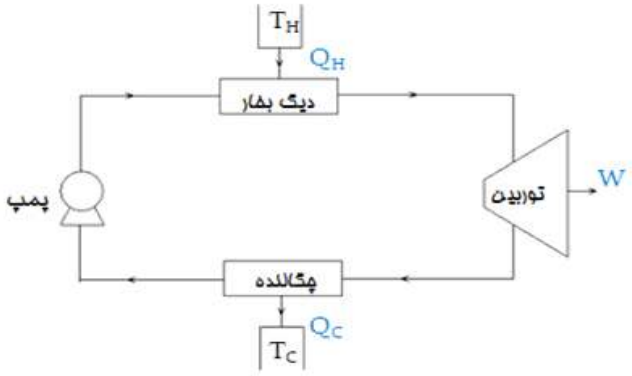
سیکل رانکین یک سیکل ترمودینامیکی است که گرما را به کار تبدیل می کند. سیال عامل این سیکل معمولا آب می باشد. این سیکل حدود ۸۰ ٪ نیروی الکتریکی استفاده شده در سرتاسر جهان را تولید می کند. این سیکل توسط دانشمند اسکاتلندی به نام ویلیام جان مک گورن رانکین نامگذاری شد. زغال سنگ، گاز طبیعی، نفت و انرژی هسته ای، منابع حرارتی رایج برای نیروگاههایی هستند که از سیکل رانکین استفاده می کنند.

http://www.mohandes-iran.com

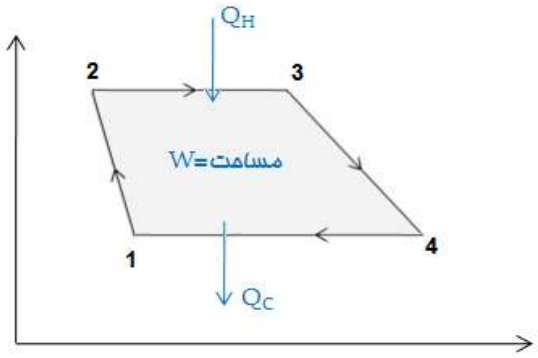
زمانی که از یک توربین با بازده ۱۰۰ ٪ در سیکل رانکین استفاده شود، بعضی اوقات به آن سیکل کارنوی کاربردی گفته می شود چون دیاگرام T-S آن شبیه به دیاگرام سیکل کارنو میشود.تنها اختلاف این است که از یک پمپ برای متراکم کردن مایع به جای کمپرسور گازی استفاده می شود. استفاده از پمپ نیازمند ۱ ٪ انرژی بیشتر در مقایسه با فشرده سازی یک گاز در داخل کمپرسور می باشد. بازده سیکل رانکین معمولا بوسیله سیال عامل محدود می شود. اگر فشار در ناحیه فوق بحرانی نباشد، دمای ورودی توربین معمولا ۵۶۵°C و دمای کندانسور حدود ۳۰°C می باشد. این مقادیر باعث بازده تئوریکی ۶۳ ٪ می شود در مقایسه با بازده واقعی ۴۲ ٪ برای نیروگاههای پیشرفته که با زغال سنگ کار می کنند. این دمای ورودی توربین پایین(در مقایسه با توربین گازی) باعث می شود تا سیکل رانکین اغلب به عنوان سیکل زیرین در سیکل های ترکیبی نیروگاههای توربین گازی استفاده شود.یکی از مزیت های اساسی سیکل رانکین که آن را برتر از سیکل های دیگر قرار می دهد این است که در فرآیند تراکم کار نسبتا کمی برای پمپ نیاز است چون سیال عامل در این نقطه در فاز مایع خود می باشد. کار مورد نیاز برای پمپ حدود ۱٪ تا ۳٪ قدرت توربین می باشد. سیال عامل در سیکل رانکین از یک حلقه بسته تبعیت می کند و به طور مداوم تکرار می شود. بخار آب و قطرات کوچک موجود در نیروگاه ها ، بوسیله سیستم های خنک کننده ایجاد می شوند و نشان دهنده گرمای تلف شده ای هستند که نمی توانند به کار مفید تبدیل شوند. این باید ذکر شود که برج های خنک کن با استفاده از گرمای نهان تبخیر سیال خنک کننده کار می کنند. اگرچه مواد زیادی می توانند در سیکل رانکین به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گیرند ولی آب معمولا به خاطر خواص مطلوبی چون غیر سمی بودن، فراوان بودن، هزینه پایین و خواص ترمودینامیکی خود، سیال انتخابی است.

http://www.mohandes-iran.com

این چرخه، مدلی برای یک نیروگاه بخار ساده است. فرایندهای ترمودینامیکی در این چرخه به صورت زیر است:



نمایش شماتیک اجزای چرخه رانکین



از ۱ به ۲ : ابتدا سیال به کار رفته در چرخه که عمدتا آب است، طی یک فرآیند آدیاباتیک در پمپ، پمپ شده و به سوی دیگ بخار هدایت می شود.

از ۲ به ۳ : در ادامه طی یک فرآیند فشار ثابت در دیگ بخار، به سیال گرما داده می شود و سیال به صورت فوق داغ در می آید.

از ۳ به ۴ : بخار فوق داغ، طی یک فرآیند انبساط آدیاباتیک در توربین منبسط شده و پره های توربین را به حرکت در می آورد.طی این فرآیند بخشی از بخار مایع می شود.

http://www.mohandes-iran.com

از ۴ به ۱ : در چگالنده طی یک فرآیند هم فشار از سیال(مایع و بخار) گرما گرفته می شود و سیال به صورت مایع در می آید.

سیکل برایتون Brayton cycle :

این سیکل توسط یک مهندس آمریکایی به نام جرج برایتون در سال ۱۸۷۲ ارائه شده است و بر همین اساس و به افتخار وی، سیکل برایتون نامیده شد. به کمک آن می‌توان رفتار سیستم، شرایط عملیاتی و میزان کار و انرژی مصرف شده و یا تولید شده را محاسبه کرد، لذا اساس توربین های گازی بر این سیکل بنا شده است

چرخهٔ برایتون چرخهٔ ایده‌آل توربین گازی است. این چرخه از دو فرآیند بی‌دررو-بازگشت‌پذیر (و در نتیجه آیزنتروپیک) و دو فرآیند فشار ثابت تشکیل می‌شود گاز ضمن فرآیند ۱ تا ۲ به طور آیزنتروپیک متراکم می‌شود در فرآیند فشار ثابت ۲ تا ۳، گرم می‌شود، و آنگاه ضمن فرآیند ۳ تا ۴ به طورآیزنتروپیک در توربین منبسط می‌شود. فرآیند خنک شدن گاز از نقطهٔ ۴ تا نقطهٔ ۱ یا در یک مبادله‌کن گرما (در چرخهٔ بسته) یا در جو (در چرخهٔ باز) صورت می‌گیرد.

فرآیند ۱ تا ۲ : هوا در نقطه یک یعنی نقطه ای با فشار اتمسفر و دمای محیط به داخل کمپرسور مکیده می‌شود. این هوا درون کمپرسور فشرده شده و در پی این فرآیند، آنتروپی ثابت، دمای آن افزایش می‌یابد. (نقطه ۱ به نقطه ۲) همانطور که دیده می‌شود همزمان با افزایش فشار، حجم هوا نیز کاهش می‌یابد. این هوا با شرایط نقطه دو یعنی نقطه‌ای با فشار بالا و دمای بالا، از کمپرسور خارج می‌شود.

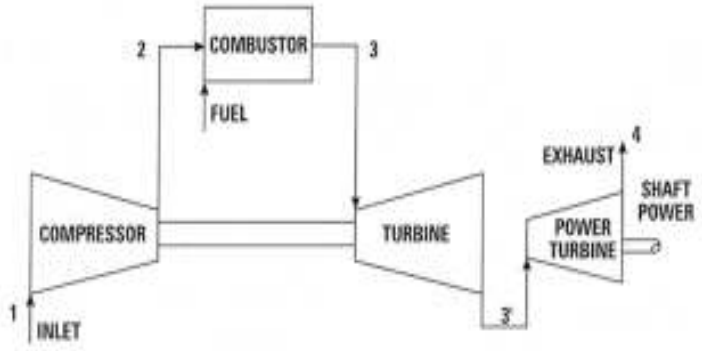
فرآیند ۲ تا ۳ : در این فرآیند، هوای فشرده شده با شرایط نقطه دو، وارد اطاق احتراق می‌شود. در این بخش و با تزریق سوخت، عمل احتراق در فشار ثابت صورت گرفته و شعله تشکیل می‌شود. در عمل احتراق با انبساط حجمی گازها روبه رو هستیم. این هوا با شرایط نقطه سه یعنی نقطه ای با فشار بالا و دمای بسیار بالا اطاق احتراق را ترک می‌کند.

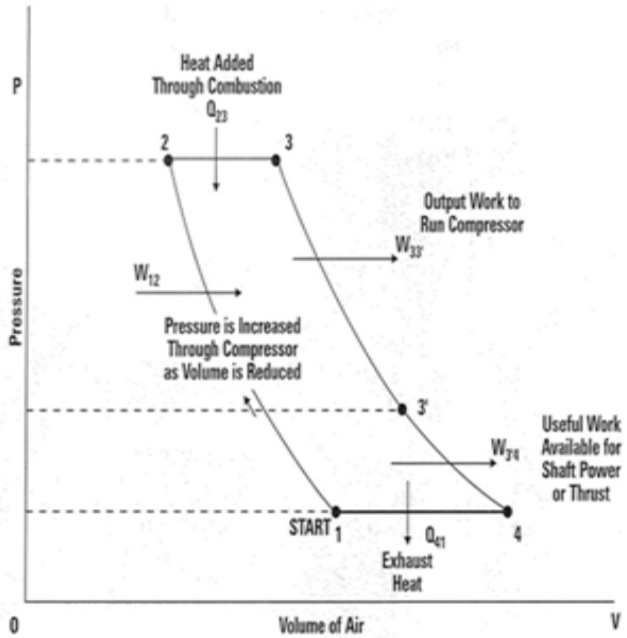
http://www.mohandes-iran.com

فرآیند ۳ تا ۴ : در این فرآیند سیال عامل وارد بخش توربین می‌گردد. این بخش متشکل از مراحلی است که هر مرحله نسبت به مرحله قبلی خود دارای حجم بیشتری است. برای آنکه سیال عامل بتواند از یک مرحله عبور کرده و وارد مرحله بعدی گردد، باید بتواند نیروی مقاوم که همان پره‌های توربین هستند را به حرکت درآورد.

غلبه بر نیروی مقاوم و انجام کار، سبب کاسته شدن فشار و دمای سیال عامل و انبساط آن می‌گردد. سیال حداکثر می‌تواند در طی این فرآیند آنتروپی ثابت تا رسیدن به فشار محیط، منبسط شود. سیال عامل با شرایط نقطه چهار یعنی نقطه‌ای با فشار اتمسفر و دمای بالا از توربین خارج می‌گردد.

فرآیند ۴ تا ۱: برای تداوم کار توربین گاز، لازم است که سیال عامل نقطه چهار به شرایط هوای نقطه یک، رسانده شود تا مجدداً توسط کمپرسور وارد دستگاه گردد.



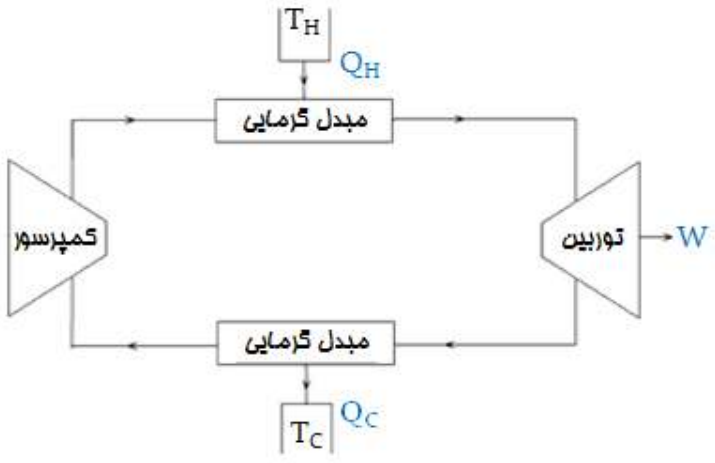


http://www.mohandes-iran.com

سیکل ترمودینامیکی توربینهای گازی سیکل استاندارد هوایی یا برایتون می باشد که در حالت ایده ال مطابق شکل زیر شامل دو فرایند ایزنتروپیک در کمپرسور و توربین و دو فرایند ایزو بار در محفظه احتراق و دفع گازها می باشد .

سیکلهای توربینهای گازی در دونوع باز و بسته می باشند . در سیکل باز گازهای خروجی از توربین به درون اتمسفر تخلیه می شوند که این سیکل بیشتر در موتورهای هواپیما مورد استفاده قرار می گیرد . در نوع بسته که عمدتاً در نیرو گاههای برق مورد استفاده قرار می گیرد گازهای خروجی از توربین (مرحله ۴) از درون بخش دفع گرما (cooler) عبور کرده و بعد از خنک شدن مجددا وارد کمپرسور گردیده و سیکل تکرار می شود .این چرخه، یک چرخه ایده آل برای توربین های گازی است. که این چرخه به دو صورت زیر می تواند باشد:

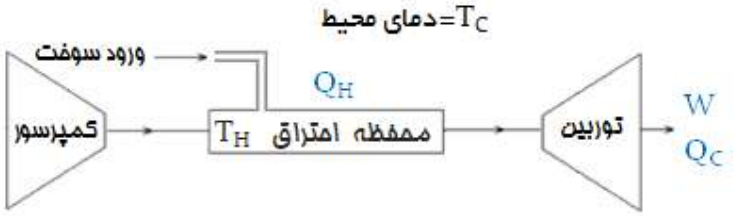
- چرخه برایتون با احتراق خارجی
- چرخه برایتون با احتراق داخلی



نمایش شماتیک اجزای چرخه برایتون با احتراق خارجی

http://www.mohandes-iran.com

در چرخه چرخه برایتون با احتراق خارجی(شکل صفحه قبل) معمولا از هوا به عنوان سیال چرخه استفاده می شود. در چرخه برایتون با احتراق داخلی،ابتدا هوا در کمپرسور فشرده می شود و سپس به سوی محفظه احتراق هدایت می شود. سپس در محفظه احتراق به همراه یک سوخت هیدروکربنی واکنش سوختن با اکسیژن هوا انجام می شود. در انتها، در توربین ضمن انجام کار، گازهای زائد دفع می شوند.



نمایش شماتیک اجزای چرخه برایتون با احتراق داخلی

فرایندهای ترمودینامیکی در چرخه احتراق خارجی به صورت زیر است:

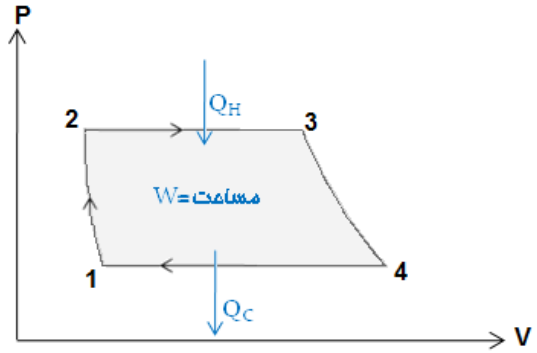
(1-2) ←ابتدا سیال به کار رفته در چرخه که عمدتا هوا است، طی یک فرآیند آدیاباتیک در کمپرسور فشرده شده و به سوی مبدل گرمایی ارسال می شود.

(2-3) ←در ادامه طی یک فرآیند فشار ثابت در مبدل گرمایی، از طریق یک فرآیند مانند فرآیند احتراق به سیال چرخه گرما داده می شود تا فوق داغ می شود.

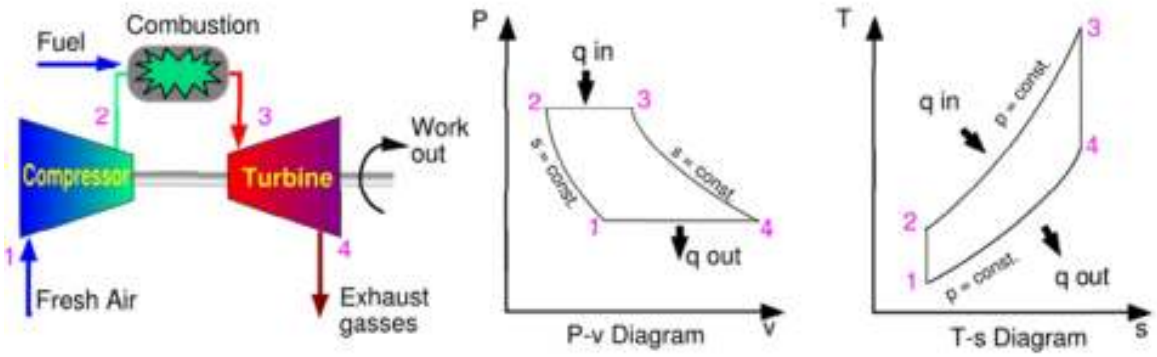
(3-4)← گاز فوق داغ، طی یک فرآیند آدیاباتیک در توربین منبسط شده و پره های توربین را به حرکت در می آورد.

(4-1) ←در مبدل گرمایی طی یک فرآیند هم فشار از گاز چرخه گرما گرفته می شود و دمای گاز به دمای اولیه بر می گردد. در شکل صفحه بعد، نمودار فشار-حجم(P-V) این فرآیند نشان داده شده است.

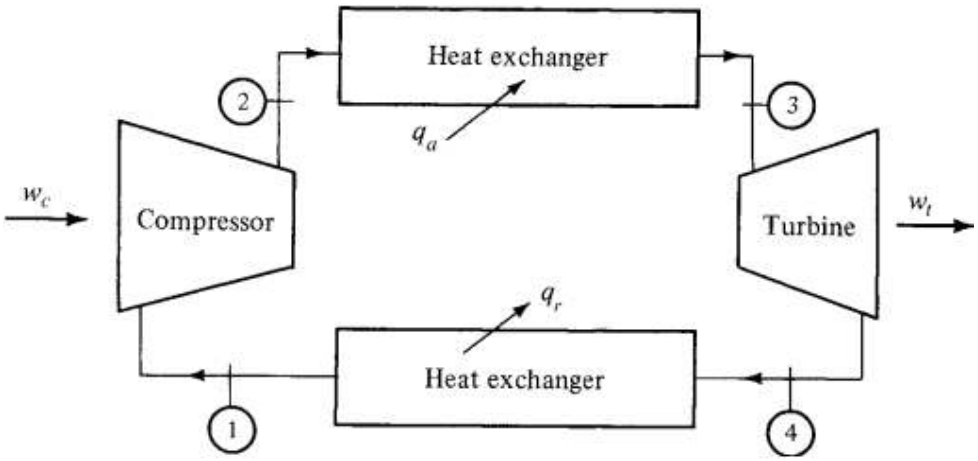
http://www.mohandes-iran.com



نمودار P-Vچرخه برایتون



Idealized Brayton Cycle



closed cycle

1. two reversible adiabatic processes and
2. two reversible constant-pressure processes.

http://www.mohandes-iran.com

سیکل برایتون یک سیکل استاندارد است که شامل دو فرایند فشار ثابت و دو فرایند آنتروپی ثابت(آیزنتروپیک) یا به عبارتی دیگر برگشت پذیر و آدیاباتیک است که برای مدل کردن واحدهای گازی بکار برده میشود.فرایندهای فشار ثابت مربوط به انتقال حرارت و فرایندهای آیزنتروپیک مربوط به توربین و کمپرسور است بنابراین میتوان گفت سیکل برایتون شامل چهار فراین است. ۱)تراکم آدیاباتیک ۲) فرایند گرماگیری در فشار ثابت ۳) انبساط آدیاباتیک ۴) فرایند گرمادهی در فشار ثابت همانطور که در شکل صفحه قبل پیدا است هوای محیط در داخل کمپرسور از فشار $P_۱$ تا $P_۲$ طی یک فرآیند آیزونتروپیک متراکم می گردد و بعد در اتاق احتراق توسط سوخت پاشیده شده احتراق صورت می گیرد. فرآیند احتراق تقریباً در فشار ثابت انجام می شود. در اثر احتراق دمای سیال عامل زیاد می شود و از T_2 به T_3 می رسد محصولات احتراق از اتاق احتراق خارج شده و در داخل توربین از P_3 تا فشار جو منبسط می گردد و به داخل هوای محیط تخلیه می شود. توربین و کمپرسور به طور مکانیکی به هم متصل شده اند. بنابراین کار خالص برابر است با اختلاف بین کار انجام شده توسط توربین و کار مصرف شده توسط کمپرسور. برای آغاز کار کمپرسور یک راه انداز (استاتور) لازم خواهد بود، وقتی توربین شروع به کار کرد، راه انداز قطع می شود.

http://www.mohandes-iran.com

$$\dot{Q}_{CV} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i \right) = \frac{dE}{dt}_{sys} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right) + \dot{W}_{cv}$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{m}_i &= \dot{m}_{comp.} = \dot{m}_{air} \\ \dot{m}_e &= \dot{m}_{tur.} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \\ \dot{m}_{fuel} &<< \dot{m}_{air} \end{aligned}\right\} \quad \dot{m}_i = \dot{m}_e = m$$

قانون اول ترمودینامیک برای سیکل توربین گازی:

فرایند حالت یکنواخت-جریان یکنواخت (USUF) Uniform State Uniform Flow

$Q_{12}=0 \quad \rightarrow W_{12}=m(h_1-h_2)$

$W_{23}=0 \quad \rightarrow Q_{23}-0=m(h_3-h_2)$

$Q_{34}=0 \quad \rightarrow W_{34}=m(h_4-h_3)$

$W_{41}=0 \quad \rightarrow Q_{41}-0=m(h_1-h_4)$

Work done = Heat supplied – Heat rejected → $W_{NET}=Q_{23}-Q_{41}$

$W_{NET}= m(h_3-h_2) - m(h_1-h_4)$ is net work output , $Energy/time$

$W_{NET} = (h_3-h_2)-(h_1-h_4) =cp(T_3-T_2)-cp(T_1-T_4)$, $Energy/mass$

به عبارتی دیگر گرمای مبادله شده برابر است با:

$$Q=m.cp.\Delta T$$

http://www.mohandes-iran.com

راندمان ترمودینامیکی توربین گازی Thermodynamic Efficiency

با در نظر گرفتن سیکل پایه(سیکل بسته برایتون) و در نظر گرفتن گاز کامل راندمان توربین گازی را محاسبه میکنیم .با مراجعه به محاسبات صفحه قبل و نمودار(P-V) سیکل برایتون می توان بازده حرارتی سیکل را بر مبنای یک کیلوگرم از سیال عامل پیدا نمود..با تکرار بخشی از محاسبات قبلی داریم:

حرارت افزوده شده به سیستم Heat supplied to the system(Heat Added) :

$$h_2 + Q = h_3 + W_S \text{ , } W_S=0 \quad \rightarrow \text{Heat added} = q_a = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

و چون گرمای ویژهٔ فشار ثابت C_P در کل فرآیند ۳-۲ ثابت است

$$h_4 + Q = h_1 + W_S \text{ ,} W_S=0 \quad \rightarrow \quad \text{Heat rejected} = q_r = h_4 - h_1 = c_P(T_4 - T_1)$$

میدانیم که:

W_{net}= کار خالص =حرارت پس داده شده – حرارا افزوده شده $= c_P[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]$

این مقدار کار را می توان از راه محاسبه کار توربین و کمپرسور با در نظر گرفتن جریان ثابت(Steady) نیز به دست آورد, کار انجام شده توسط توربین یا شفت برابر است با :

$$h_3 + Q = h_4 + W_T \quad \text{, } Q=0$$

$$\text{Work done of turbine} = W_T = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4)$$

کار مصرف شده به وسیله کمپرسور:

$$h_1 + Q = h_2 + w_c \quad \text{, } Q=0$$

$$\text{Work consumption of compressor} = W_C = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

http://www.mohandes-iran.com

W_{net} = کار مصرف شده به وسیله کمپرسور - کار تولید شده به وسیله توربین

The net work output is $\rightarrow w_n \equiv w_t - w_c = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$

$$W_{net} = c_P[(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] = c_P[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]$$

به عبارتی دیگر کل گرمای اضاف شده:

The net heat added$=Q_n \equiv Q_a - Q_r = (h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)$

بنابراین بازده حرارتی عبارت است از نسبت کار خالص سیکل به هزینهٔ انجام شده به عبارتی دیگر راندمان توربین‌های گازی بصورت کار تولید شده به ازاء انرژی حرارتی ایجاده شده توسط سوخت تعریف می‌شود.

The thermal efficiency of the cycle is

$$\eta_{th} = \frac{Wt - Wc}{q_a} = \frac{Wn}{Qa}$$

$$\eta_{th} = \frac{(h3-h4)-(h2-h1)}{(h3-h2)} = \frac{(h3-h2)-(h4-h1)}{(h3-h2)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(h4-h1)}{(h3-h2)} = 1 - \frac{Qr}{Qa}$$

بنابراین:

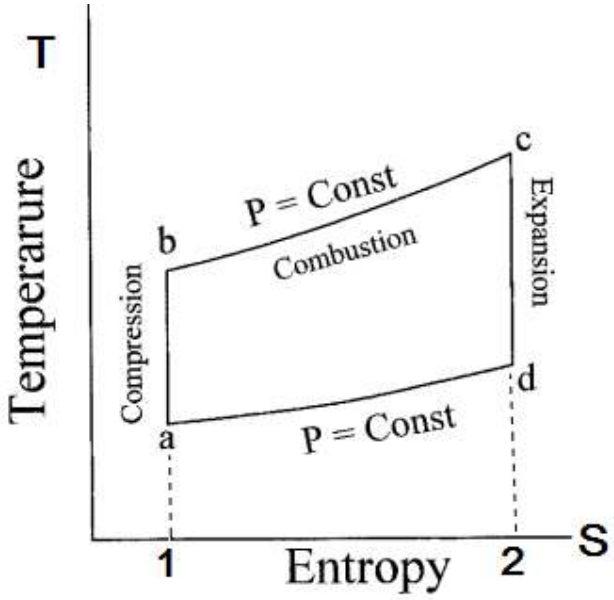
$$Wn=Qn \rightarrow \frac{Wn}{Qa} = \frac{Qn}{Qa} = \frac{Qa-Qr}{Qa} = 1 - \frac{Qr}{Qa}$$

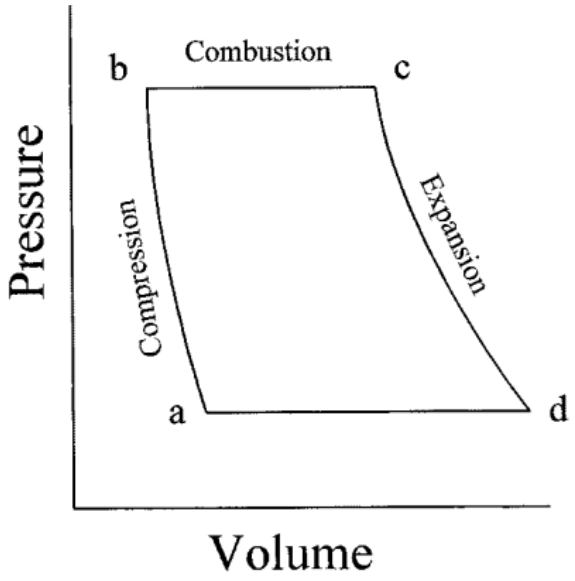
به عبارتی دیگر میتوان معادله را اینگونه نوشت:

$$\Delta h = cp\Delta T \ , \ \rightarrow \boldsymbol{\eta_{th} = 1 - \frac{cp(T4-T1)}{cp(T3-T2)} = 1 - \frac{(T4-T1)}{(T3-T2)}}$$

http://www.mohandes-iran.com

با توجه به اینکه در نمودار فشار-حجم، تغییرات دمایی بخشهای مختلف سیکل قابل مشاهده نمی‌باشد، از اینرو از نمودار دما-آنتروپی این سیکل استفاده می‌گردد. سطح زیر نمودار 1-b-c-d معرف مقدار انرژی است که توسط سوخت به توربین گاز وارد شده است. سطح زیر نمودار 1-a-d-2 معرف مقدار انرژی است که بصورت حرارت از اگزوز خارج می‌گردد. با این تعریف می‌توان نتیجه گرفت که سطح زیر سیکل برایتون یا a- b- c- d معرف کار تولید شده توسط توربین است. راندمان توربین‌های گازی همانطور که گفته شد بصورت کار تولید شده به ازاء انرژی حرارتی ایجاده شده توسط سوخت تعریف می‌شود.

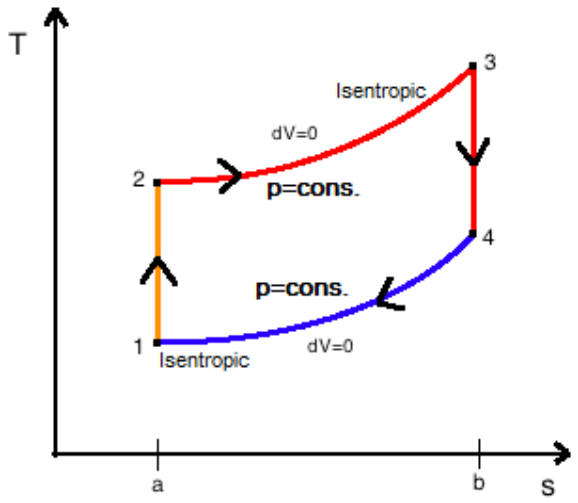




http://www.mohandes-iran.com

همانطور که در نمودار فشار-حجم سیکل برایتون، قابل مشاهده است، هر چه فشار ورودی به توربین بالاتر باشد، راندمان کلی سیکل بالاتر خواهد بود. البته بالا بردن فشار نیاز به کمپرسور بزرگتری دارد که در عمل این کمپرسورها نیاز به انرژی بیشتر داشته و در نهایت از دید عملیاتی مناسب نمی‌باشند. دمای احتراق سوخت در محفظه احتراق در حدود $^{\circ}C$ ۱۶۰۰ می‌باشد که اگر گازهای حاصل از احتراق بخواهد با همین دما وارد بخش توربین شود، باعث آسیب زدن بخش های مختلف توربین می‌شود. به همین دلیل، دمای گازهای حاصل از احتراق، باید با تزریق هوای اضافی پایین آورده شود. با توجه به اینکه برای تهیه این هوای اضافی، کمپرسور باید هوای بیشتری را فشرده سازد، بخشی از کار تولیدی توربین نیز صرف تامین انرژی مورد نیاز کمپرسور می‌شود تا بدین صورت، مشکل آسیب دیدگی دستگاهها در دمای بالا رفع گردد. هرچند که صرف انرژی برای فشرده کردن هوای اضافی باعث کاهش راندمان توربین گاز می‌شود اما در عمل به خاطر محدودیت های ساخت، گریزناپذیر می‌باشد. بدین ترتیب، دمای محصولات احتراق با تزریق هوای اضافی به محفظه احتراق، در حدود ۱۰۶۰ درجه سانتیگراد کنترل می‌شود. البته طراحان و سازندگان توربین های گازی تلاش می‌کنند تا با بالا بردن مقاومت تنشی و حرارتی بخشهای مختلف توربین گاز، اجازه دهند تا گازهای حاصل از احتراق با دمای بیشتری وارد توربین شده و به این شکل با بالابردن دمای گازهای ورودی به توربین وکاستن از مقدار هوای اضافی مورد نیاز، راندمان توربین افزایش یابد. همانطور که قبلاً گفته شد، سیال عامل در نقطه چهار باید به شرایط هوای نقطه یک رسانده شود، تا مجدداً توسط کمپرسور وارد دستگاه گردد. از آنجایی که خنک کردن گازهای خروجی تا دمای اولیه، هزینه های زیادی به سیستم تحمیل می‌کند و با توجه به اینکه هوای مورد نیاز با شرایط نقطه یک در محیط موجود است، لذا گازهای سوخته به اتمسفر رها می‌شود و هوای تازه توسط کمپرسور از محیط مکیده می‌شود. علاوه بر آن در گازهای حاصل از احتراق، میزان اکسیژن کاهش یافته و مناسب برای احتراق مجدد نمی‌باشد. بدین ترتیب، حجم عظیمی از انرژی نیز به همراه گاز سوخته از دست می‌رود. البته با اتخاذ رو شهای خاصی چون استفاده از بویلرهای بازیافت حرارتی یا H.R.S.G ها می‌توان بخشی از این حرارت را بازیافت کرد . نمونه چنین سیستمی در پتروشیمی فجر و مبین وجود دارد

http://www.mohandes-iran.com



می دانیم که در یک فرایند آیزونتروبیک (بر فرض کامل بودن گاز):

$$\Delta S_{a-b} = cp.\ln\frac{Tb}{Ta} - R.\ln\frac{Pb}{Pa}, \quad \Delta P=0$$

بنابراین ترم دوم معادله صفر خواهد شد و نتیجه میگیریم که :

$$\Delta S_{2-3} = \Delta S_{4-1} \quad \rightarrow \quad cp.\ln\frac{T3}{T2} = cp.\ln\frac{T4}{T1}$$

و از آنجایی که ظرفیت حرارتی ثابت است

$$\frac{T3}{T2} = \frac{T4}{T1}$$

میدانیم در یک فرایند آیزونتروبیک بین فشار، دما و حجم گاز در رابطه زیر برقرار است:

برای فرایند تراکمپذیری در کمپرسور:

For compression 1-2

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T_2 = T_1\left[\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]$$

http://www.mohandes-iran.com

برای فرایند انبشاط پذیری در توربین:

For expansion 3-4

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T_3 = T_4\left[\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]$$

طبق فرمول محاسبه بازده داریم:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(T4-T1)}{(T3-T2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\left[\left\{T_4\left(\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right)\right\} - \left\{T_1\left(\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right)\right\}\right]}$$

$$= 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\left[\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}(T_4 - T_1)\right]}$$

با توجه به اینکه نسبت فشار $\frac{P_2}{P_1}$ را به r_p نشان می

دهیم،بنابراین:

$$\frac{P3}{P4} = \frac{P2}{P1} = r_P$$

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r_p}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

http://www.mohandes-iran.com

به عبارتی دیگر نظر به اینکه $P_2=P_3$ و $P_1=P_4$ می توان نوشت:

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{T_3}{T_4}=\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{T_4}{T_3}=\frac{(T_4-T_1)}{(T_3-T_2)}$$

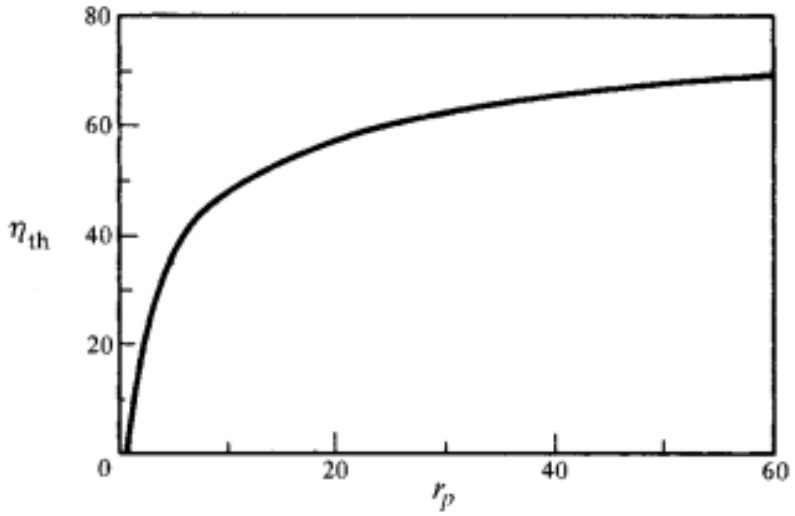
با قرار دادن مقدار $\frac{(T_4-T_1)}{(T_3-T_2)}$ از معادله فوق در معادله راندمان قبلی خواهیم داشت:

$$\eta_{th}=1-\frac{T_1}{T_2}=1-\frac{T_4}{T_3} \quad \rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}=\left(r_p\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{1}{\left(r_p\right)^{(r-1)/r}} \quad \rightarrow \quad \eta_{\text{th}}=1-\left(\frac{1}{r_p}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

باید بخاطر داشته باشیم که این معادله فقط برای سیکل ایده آل برایتون و برای یک گاز کامل است

نمودار شکل زیر یک راندمان ترمودینامیکی از سیکل برایتون ایده آل را نشان میدهد.که نسبت های فشار را بر حسب راندمان ترسیم کرده است



Thermodynamic efficiency of ideal Brayton cycle ($\gamma = 1.4$).

http://www.mohandes-iran.com

همانطور که ازنمودار پیداست راندمان حرارتی با افزایش نسبت فشار افزایش می یابد. اما همانطور که از این نمودار پیداست این افزایش یکنواخت و خطی نیست، بلکه از نسبت فشار ۱ تا ۴ دارای شیب تند خطی می باشد و از آن به بعد نرخ آن کاسته می شود. از نسبت فشار ۱۶ به بعد تغییرات راندمان حرارتی بر حسب نسبت فشار خیلی محسوس نیست، بنابراین می توان پیشنهاد کرد که برای راندمان حرارتی ماکزیمم یک نسبت فشار بهینه باید وجود داشته باشد .

نسبت فشار برای حداکثر کار خالص ویژه سیکل نظری برایتون

اگر شرایط سیکل را ایده آل فرض کنیم، برای تغییر قدرت خروجی، تنها عامل متغیر نسبت فشار می باشد. حداقل نسبت فشار، یک است که به ازاء آن قدرت خروجی صفر می شود، در این صورت:

$$(r_p)_{\min} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{(r-1)/r} = 1$$

اگر دمای خورجی کمپرسور به دمای ورودی توربین یعنی T_3 برسد حرارت افزوده شده در اتاق احتراق صفر خواهد بود. در نتیجه مقدار کار کمپرسور و توربین با هم برابر می شود. و کار خروجی (خالص) در این حالت هم صفر می شود. این نسبت فشار ماکزیمم برابر است با:

$$(r_p)_{\min} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{r/(r-1)}$$

بنابراین هیچ کدام از دو روش فوق الذکر عملی نیست و باید یک نسبت فشار میانی وجود داشته باشد که به ازاء آن قدرت خروجی یا بازده (با توجه به محدوده دمایی که توربین با آن مواجه است) حداکثر بشود. برای به دست آوردن نسبت فشاری که به ازاء آن قدرت خروجی حداکثر شود (قدرت خروجی به ازاء یک کیلوگرم سیال عامل) به روش زیر عمل می کنیم

$$Wnet = C_P\left[(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)\right]$$

http://www.mohandes-iran.com

$$Wnet = C_P\left[T_3\left(1-\frac{T_4}{T_3}\right)-T_1\left(\frac{T_2}{T_1}-1\right)\right] \qquad = C_P T_1\left[\frac{T_3}{T1}\left(1-\frac{T_4}{T_3}\right)-\left(\frac{T_2}{T_1}-1\right)\right]$$

از طرفی داریم

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(r-1)/r} \qquad \text{و} \qquad \frac{T_3}{T_4}=\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(r-1)/r}$$

با توجه به اینکه دوطرف راست معادله فوق با هم برابر است می توان نوشت:

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{T_3}{T_4}$$

بنابراین

$$W_{net}=C_P T_1\left[\frac{T_3}{T_1}\left(1-\frac{1}{r_P^{(r-1)/r}}\right)-\left(r_P^{(r-1)/r}-1\right)\right]$$

حداکثر و حداقل فشار در سیکل برایتون:

در معادله بالا T_1 , T_3 حداقل و حداکثر دمای سیال می باشند، γ و C_P مقادیر ثابت محسوب می شوند.

برای به دست آوردن فشاری که به ازاء آن قدرت خروجی حداکثر می شود از معادله بالا بر حسب r_P مشتق می گیریم و آن را مساوی صفر قرار می دهیم:

$$\frac{dW_{net}}{dr_P}=0$$

http://www.mohandes-iran.com

$$\frac{\frac{T_3}{T_1}\left(\frac{(r-1)}{r}\right)(r_P)^{\left(\frac{r-1}{r}\right)-1}}{\left[r_P^{\left(\frac{(r-1)}{r}\right)}\right]^2}-\left(\frac{(r-1)}{r}\right)(r_P)^{\left(\frac{r-1}{r}\right)-1}=0$$

طرفین معادله فوق را بر $\left(\frac{(r-1)}{r}\right)(r_P)^{\left(\frac{r-1}{r}\right)-1}$ تقسیم می کنیم در نتیجه معادله به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\frac{T_3}{T_1}}{(r_P)^{z(r-1)/r}}=1\Rightarrow(r_P)^{z^{(r-1)}/_r}=\frac{T_3}{T_1}$$

$$r_P=\sqrt[2]{\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{r/r-1}}$$

سیکل عملی(واقعی) برایتون Brayton real cycle :

سیکل عملی (واقعی) توربین گاز از نقطه نظرهای زیر با سیکل نظری برایتون تفاوت دارد:

1- به علت وجود تلفات اصطکاکی در کمپرسور و توربین، فرآیند تراکم و انبساط بدون اصطکاک نیست و با مقداری افزایش در انتروپی همراه می باشد (این فرآیندها آدیاباتیک برگشت ناپذیر می باشند) در حالت ایده آل بازده کمپرسور و توربین ۱۰۰٪ می باشد اما در عمل کمتر است.

2- در اتاق احتراق افت فشار مختصری وجود دارد. این افت فشار (تلفات) به قدری کم است که به منظور ساده شدن مسأله هرجا که لازم باشد می توان از آن صرفنظر نمود.

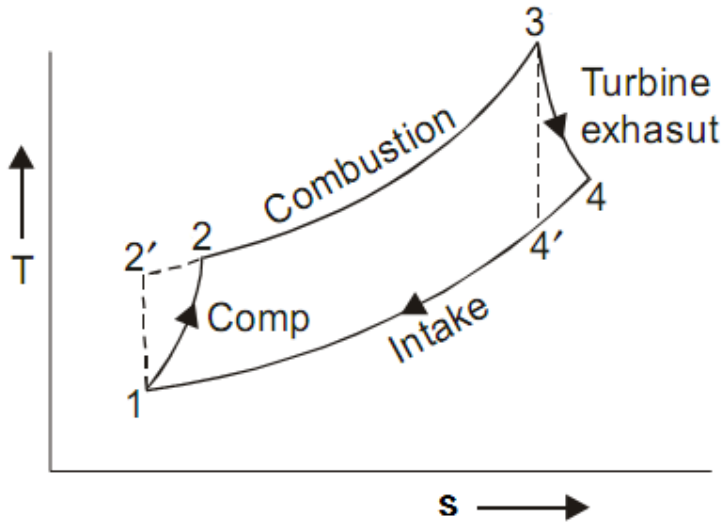
3- جرم گازی که از داخل توربین عبور می کند (1+f) برابر جرم هوایی است که از داخل کمپرسور عبور می کند که f نشان دهنده نسبت جرم سوخت به جرم هوا می باشد.

4- گرمای ویژه گازهای حاصل از احتراق کمی بیشتر از گرمای ویژه هوا می باشد.

البته این افزایش به قدری کم است که گرمای ویژه گازهای حاصل از احتراق را می توان برای ساده شدن

http://www.mohandes-iran.com

مسأله هرجا که لازم است با گرمای ویژه هوا مساوی فرض کرد. شکل زیر انحراف سیکل واقعی برایتون را در حالت واقعی نشان می دهد به عبارتی دیگر نمایش سیکل واقعی برایتون را نشان می دهد



فرآیند 1-2´ تراکم آیزنتروپیک

فرآیند ۱-۲: تراکم واقعی.

فرآیند 3-4´: انبساط آیزنتروپیک

فرآیند ۳-۴: انبساط واقعی.

بازده کمپرسور در سیکل واقعی برایتون:

بازده کمپرسور برابر است با کار انجام شده ورودی ایده آل به کار انجام شده ورودی واقعی

$$\eta_c = \frac{\text{ideal work input}}{\text{actual work input}} \quad \rightarrow \quad \eta_c = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{C_P\left(T2' - T1\right)}{C_P\left(T2 - T1\right)}$$

چون cp ثابت است بنابراین بازده کمپرسور برابر است با:

$$\eta_c = \frac{\left(T_2' - T1\right)}{\left(T2 - T1\right)}$$

http://www.mohandes-iran.com

بازده توربین در سیکل واقعی برایتون:

بازده توربین نیز در سیکل برایتون برابرست با خروجی کار واقعی بر خروجی کار ایده آل.

$$\eta_t = \frac{W_a}{W_i} = \frac{\text{Actual work output}}{\text{Ideal work output}}$$

اگر گرمای ویژه گازهای حاصل از سوخت با گرمای ویژه هوا با هم برابر فرض شود:

$$\eta_t = \frac{C_P(T_3 - T_4)}{C_P(T_3 - T_4)} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4'}$$

بازده حرارتی سیکل بصورت زیر محاسبه می گردد :

کار مصرفی کمپرسور- کار واقعی توربین = W_{net}= کار خالص واقعی

$$W_{net} = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

حرارت افزوده شده برابر است با :

$$q_a = h_3 - h_2$$

بنابراین بازده حرارتی سیکل برابر است با:

$$\eta_{tha} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad \eta_{tha} = \frac{C_P(T_3 - T_4) - C_P(T_2 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{tha} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

اگر بجای $(T_3 - T_4), (T_2 - T_1)$ مقدار آنها را از معادلات قبلی قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\eta_{tha} = \frac{\eta_t(T_3 - T`_4) - \left(\frac{T`_2 - T_1}{\eta c}\right)}{(T_3 - T_2)} \quad \rightarrow \quad \eta_{tha} = \frac{(Wt)\eta_t\eta_c - W_C}{q_a\eta_c}$$

http://www.mohandes-iran.com

فصل چهارم

روشهای افزایش قدرت و راندمان

Methods of increasing power and efficiency

http://www.mohandes-iran.com

مقدمه

در حدود ۴۰ الی ۵۰ سال قبل افزایش در راندمان توربینهای گازی پیشرفت زیادی نکرده بود اما وضعیت این ماشین به صورت خاصی بدلیل بازار ایرکرافت بعد از جنگ جهانی دوم بهبود یافت، بگونه ای که راندمان سراسری به حدود ۲۰٪ رسید که بیشتر هم در مورد سیکلهای ساده صادق بود. سیکلهای ترکیبی راندمان هایی بالاتر از ۵۰٪ دارند زیرا بخش بزرگی از توان خارج از سیکل کارنو تولید می شود (سیکل بخاری از بازیابی حرارت در خروجی شکل می گیرد) این راندمان حرارتی سراسری نسبت به سیستمهای تولیدی دیگر که دارای رنج یکسانی از نظر توانی می باشند بالاتر است که نتیجه ان یک توسعه و پیشرفت عظیم در نیروگا هها ی مجهز به توربینهای گازی است که در سیکلهای ترکیبی فعال هستند .علاوه براین هزینه های سرمایه گذاری نیز جالب توجه است روش های بهینه سازی بازدهی و قدرت خروجی توربین گازی را می توان بر حسب مورد به دو دسته تقسیم بندی نمود:

۱-واحدهای گازی در حال بهره برداری با تغییرات جزیی

۲-واحدهای گازی در دست برنامه ریزی و طراحی با تغییرات اساسی

ویژگی های متمایز این دو نوع حالت، باعث کارایی و امکان اعمال روش های خاص برای هر یک می شود. به عنوان مثال از ویژگی های واحدهای در حال بهره برداری می توان به موارد زیر اشاره نمود

- بسیاری از شرایط اساسی واحد که بستگی به اجزاء اصلی نظیر توربین و کمپرسور دارد دارد تعیین شده اند.
- تغییرات اساسی پرهزینه است.
- تغییر هر یک از پارامترها می تواند بر بقیه تأثیر بگذارد و باید این تأثیرات بررسی شوند.
- شرایط آب و هوایی، ارتفاع، نوع توربین و مکان و فضای مورد نیاز برای نصب هر سیستم بهبود و توان خروجی، محدودیت های را اعمال می نمایند و از ویژگی های واحد در دست طراحی و برنامه ریزی را می توان به شرح زیر در نظر گرفت.

http://www.mohandes-iran.com

- شرایط اساسی و کلی واحد و نیز پارامترهای طراحی در اختیار ماست .

- هرگونه طراحی از محدودیت هایی که در شرایط بهره برداری وجود دارد قابل بررسی و طراحی است.

روش های بررسی شده دراین فصل بر روی توربین های گازی مختلف در سراسر دنیا نصب شده اند با توجه به موقعیت محل توربین گاز، شرایط آب و هوایی منطقه، نوع توربین، میزان کارکرد آن و میزان توانایی سرمایه گذاری یکی از روش های مذکور را انتخاب و اجرا می گردد. برخی از این روشها موجب افزایش قدرت و برخی دیگر موجب افزایش راندمان کلی سیکل می شوند. از روی آخرین معادله فصل قبل واضح است که بازده حراتی واقعی سیکل با اصلاح η_c, η_t یا هر دو افزایش می یابد.

برای افزایش قدرت و راندمان سیکل های ترکیبی (Combined cycle) از سیستم های فوق نیز می توان استفاده نمود ولیکن باید به این نکته توجه نمود که عموماً میزان افزایش قدرت خروجی و راندمان در این نوع نیروگاه ها در مقایسه با سیکل توربین گازی ساده کمی کمتر خواهد بود.

در این فصل روشهای بارز افزایش قدرت و راندمان را مورد بررسی قرار داده ام و به علت پیچیدگی توربین گازی و این روشها از جزئیات صرفنظر کرده ام و بیشتر به کلیات پرداخته ام مراجع گوناگونی برای مطالعه و تحقیق در مورد این روشها موجود است که به راحتی میتوان جرئیات کامل این روشها را مورد بررسی قرار داد و مطالعه کرد.

http://www.mohandes-iran.com

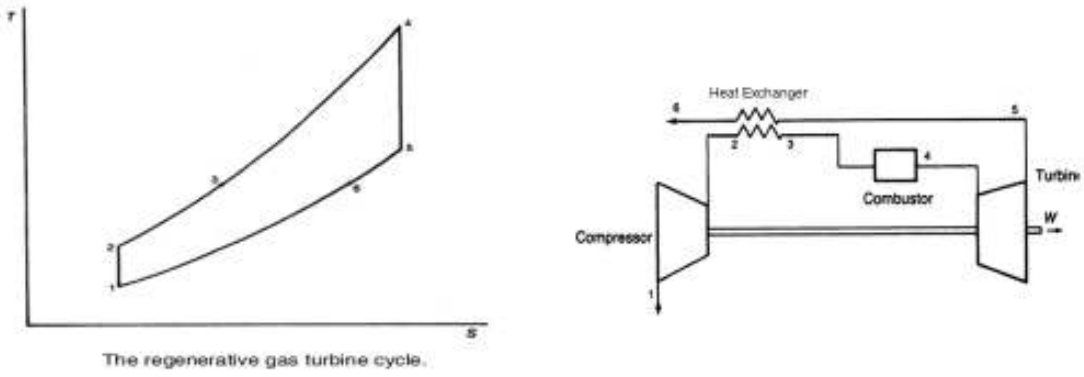
راههای اصلاح بازده و کار خروجی ویژه سیکل ساده:

برای اصلاح کار یک مولد قدرت با سیکل ساده می توان از روشهای زیر استفاده نمود.

۱- سیکل توربین گازی با بازیاب حرارتی The regenerative gas turbine cycle :

با گرم کردن اولیه هوا با استفاده از گرمای گاز خروجی توربین در مصرف سوخت صرفه جویی می شود این روش را بازیاب حرارتی گویند. این روش حدر رفتن گرما را را هم کاهش میدهد.

به دلیل اینکه بازده سیکل توربین گازی با بازیاب بیشتر از بازده سیکل ساده توربین گازی است، مصرف سوخت در این سیکل تا ۳۰ درصد و حتی بیشتر کاهش می یابد.

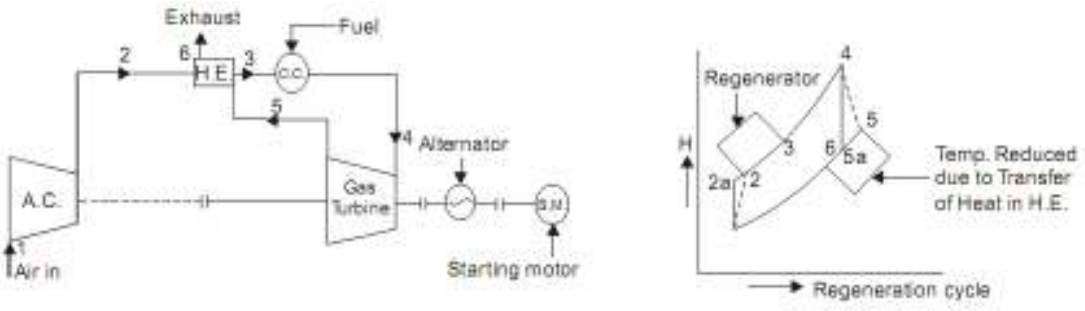


The regenerative gas turbine cycle.

استفاده از بازیاب حرارت باعث افزایش راندمان می شود ولی در عمل بخاطر مشکلاتی نظیر لزوم صرف هزینه اولیه نسبتا زیاد ، اشغال فضای زیاد، ایجاد افت فشار در مسیر حرکت سیال و.... مورد استفاده قرار نمی گیرد.

شکل صفحه بعد یک سیکل توربین گازی با بازیاب حرارتی را با جرئیات بیشتر نشان می دهد که در کنار آن نموداری از این سیکل را مشاهده میکنید.

http://www.mohandes-iran.com



در مبدل حرارتی دمای هوا درحال افزایش از T_2به T_3 هست و دمای گاز خروجی درحال کاهش از T_5 به T_6است. راندمان یا به عبارتی سودمند یا تاثیرپذیری این سیکل اینگونه تعریف میشود: مقدار دمای هوای افزایش یافته توسط مبدل به بیشترین افزایش دمای ممکن

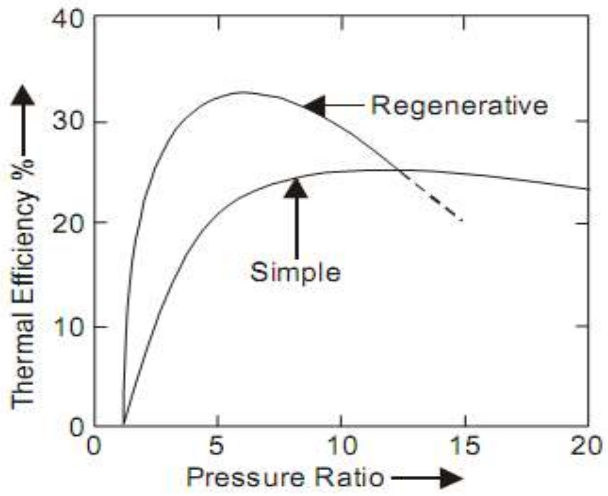
$$\text{effectiveness} = \varepsilon = \frac{\text{Rise in air temperature}}{\text{Max. possible rise}} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2}$$

و برای حالت ایده آل :

For ideal regeneration,

$$T_3 = T_5 \text{ and } T_6 = T_2$$

نمودار زیر نشان میدهد که سیکل با بازیاب حرارتی فقط زمانی در بالاترین راندمان است که نسبت فشاری در حداقل باشد که این مطلب در مورد سیکل ساده هم صادق است اگر نسبت فشاری افزایش پیدا کند راندمان تا یک حد معینی بیشتر بالا نخواهد رفت .



http://www.mohandes-iran.com

گرمای اضافه شده در محفظه احتراق کاهش می یابد و همچنین درجه حرارت بالاتری نسبت به سیک بدون بازیاب به آن اضافه میشود.بمابراین بازده حرارتی سیکل را افزایش میدهد.بازده حرارتی آن برابر است با:

$$\eta_t = \frac{C_p\,(T_4 - T_5) - C_p\,(T_2 - T_1)}{C_p\,(T_4 - T_3)}$$

و در حالت ایده آل:

For ideal regeneration, $T_3 = T_5$

$$\eta_t = 1 - \left[\frac{(T_2 - T_1)}{(T_4 - T_5)}\right]$$

یکی از روشهای افزایش راندمان سیکل های گازی استفاده از دود خروجی از توربین گازی می باشد. بنابر قانون دوم ترمودینامیک نمی توان موتور حرارتی ساخت که تنها با یک منبع سرد یا گرم تبادل حرارت نموده و کار یا توان تولید نماید. در مورد سیکل گازی به عنوان یک موتور حرارتی، منبع گرم محصولات احتراق حاصل از سوختن مخلوط سوخت و هوا در اطاق احتراق توربین گازی می باشد. منبع سرد نیز هوای محیط است. با توجه به اختلاف دمای بسیار بالا بین دود خروجی از توربین گازی با هوای محیط حرارت بسیار زیادی با منبع سرد مبادله شده و در واقع تلف می شود. بنابراین امروزه تلاشهای بسیار گسترده ای در سراسر دنیا توسط طراحان سازنده برای بهره برداری از این انرژی اتلافی صورت گرفته است. واضح است که بازیابی انرژی باعث افزایش راندمان سیکل گازی و کاهش سوخت مصرفی در سیکل می گردد. در مورد توربین گاز معمولاً دو نوع بازیاب حرارت مطرح می شود:

۱- گرم کردن هوای خروجی از کمپرسور

۲- تولید بخار به وسیله بویلر بازیاب

http://www.mohandes-iran.com

گرم کردن هوای خروجی کمپرسور:

در این روش هوای خروجی از کمپرسور از داخل یک مبدل حرارتی که با گازهای خروجی از توربین گرم می شود عبور می کند. سپس هوای گرم وارد اتاق احتراق شده و مقداری از آن برای سوخت مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به گرم بودن هوا، عمل اختلاط با سوخت و احتراق بهتر انجام شده و سوخت کمتری برای رسیدن به شرایط مناسب جهت ورود به توربین مورد نیاز خواهد بود. بنابراین با کم شدن مصرف سوخت بازده حرارتی افزایش می یابد. با اضافه کردن بازیاب حرارتی به سیکل، توربین، کمپرسور و کار خالص تولیدی تحت تأثیر قرار نمی گیرند. با فرض عبور ۱kj هوا از داخل کمپرسور (اگر از جرم سوخت صرف نظر شود)، مساوی بودن گرمای ویژه هوا و گاز خروجی از اتاق احتراق، کار خروجی از کمپرسور به روش زیر محاسبه می گردد:

کار واقعی توربین: $$Wta = h_4 - h_5 = cp(T_4 - T_5)$$

کار واقعی کمپرسور: $$Wca = h_2 - h_1 = cp(T_2 - T_1)$$

کار خالص واقعی: $$Wnet = cp[(T_4 - T_5) - (T_2 - T_1)]$$

حرارت افزوده شده: $$Qa = h_4 - h_3 = cp(T_4 - T_3)$$

در عمل تبادل حرارت کامل در دستگاه مبدل حرارتی امکان پذیر نیست به همین سبب میزان مؤثربودن مبدل حرارتی یا بازیاب حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta reg = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_2} = \frac{h_5 - h_6}{h_3 - h_6} = \frac{T_5 - T_6}{T_3 - T_6} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \qquad (۷-۶)$$

یکی از دلایل متداول نبودن استفاده از این روش، پایین بودن ضریب انتقال حرارت از یک گاز به گاز دیگر می باشد. حداکثر ضریب تأثیر آن در صورتی که سطح تبادل حرارت زیاد باشد در حدود ۷۵٪ است.

http://www.mohandes-iran.com

از دیگر معایب این روش، افت فشار هوا در مبدل حرارتی می باشد. این افت فشار با افزایش سطح تبادل حرارتی افزایش می یابد. افت فشار باعث کاهش کار تولید شده در توربین و در نتیجه کاهش قدرت و راندمان می گردد. با توجه به شکل تا مقدار معینی از نسبت تراکم با افزایش نسبت تراکم راندمان حرارتی زیاد می شود و پس از مقدار معینی از نسبت فشار یعنی موقعی که دمای هوای فشرده بیشتر از دمای دود خروجی توربین باشد راندمان حرارتی کاهش می یابد. همچنین راندمان حرارتی در نسبت فشارهای کم، یعنی در جاهایی که دما هوای متراکم شده پایین باشد حداکثر است.

تولید بخار به وسیله بویلر بازیاب:

دمای محصولات احتراق خروجی از توربین گاز حدود ۵۴۰°C می باشد که تابعی از بار واحد است. همچنین دبی محصولات احتراق برابر ۳ تا ۴ کیلوگرم بر ثانیه به ازای هر مگاوات تولیدی می باشد با توجه به بالا بودن دما و دبی دود خروجی از توربین انرژی بسیار زیادی در حدود ۱/۵ برابر توان خروجی توربین به هدر می رود. در صورت استفاده از این انرژی اتلافی برای تولید بخار در بویلر بازیاب می توان راندمان سیکل را افزایش داد. البته لازم به ذکر است به علت وجود اکسیدهای گوگرد در محصولات احتراق نمی توان دمای دود را از نقطه شبنم پایین تر آورد. بخار تولیدی را می توان جهت تولید برق در یک نیروگاه بخار، مصارف مختلف صنعتی نظیر آب شیرین کن ها، صنایع نساجی، سیستم های گرمایشی و سرمایشی به کار برد. به عبارت دیگر توان تولید همزمان برق و حرارت (Cogeneration) داشت. همچنین می توان از بخار تولیدی در یک چیلر جذبی برای ایجاد برودت استفاده کرد که این سیستم به نام تولید همزمان برق، حرارت و غیره (Trigeneration) معروف است. راندمان تولید همزمان گرما و برق بسیار بالا و در حدود ۷۰٪ تا ۹۰٪ می باشد. بنابراین استفاده از این روش راندمان کل مجموعه را بسیار بالا خواهد برد. بویلر بازیاب یک مبدل حرارتی با جریان متقاطع است که در آن انتقال حرارت به روش جابجایی صورت می گیرد بر حسب نیاز بویلر شامل سوپرهیتر، اوپراتور، اکوتومایزر خواهد بود. با توجه به مشخصات بخار مصرفی و نوع استفاده از آن از بویلرهای بازیاب گوناگون استفاده می شود. متداولترین بویلرهای بازیاب موجود به صورت زیر می باشد.

http://www.mohandes-iran.com

- بویلرهای عمودی

- بویلرهای افقی

- بویلرهای بدون مشعل

- بویلرهای بازیاب با مشعل

با توجه به اینکه دمای گازهای خروجی از توربین گازی در کل تحول خنک شدن آن از دمای آب و بخار سیکل بخاری در کل تحول گرم شدن آن در دیگ بخار بالاتر می باشد. بنابراین به راحتی می توان عمل گرایش آب در دیگ بخار یک نیروگاه بخاری ساده را توسط گازهای خروجی توربین گازی انجام داد و احتراق در بویلر نیروگاه بخاری را حذف نمود. این اقدام در واقع یکی از مهمترین و متداولترین روش های افزایش راندمان حرارتی بوده و سیکل ترکیبی نمایده می شود.

۲-اصلاح قدرت خروجی واحد توربین:

الف) گرم کردن مجدد: Reheating

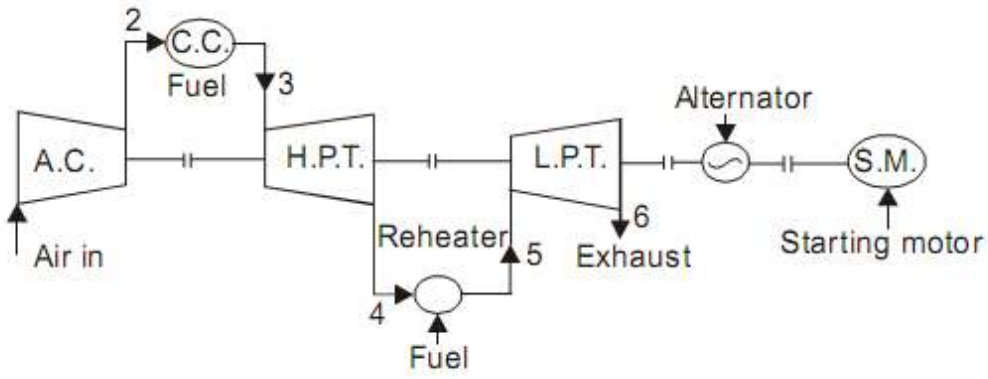
انبساط کامل در توربین در دو یا چند طبقه حاصل می شود و پس از هر مرحله از انبساط گرم کردن مجدد صورت می گیرد. در یک سیک با گرمایش مجدد گازهای حاصل از احتراق در یک توربین منبسط نمی شوند در حالی که در دو توربین منبسط خواهند شد. گازهای خروجی از توربین فشار بالا وارد یک گرمکن میشوند و دمای آنها افزایش میابد سپس وارد توربین فشار پایین میشوند و منبسط میگردند بوسیله این گرمکن میانی قدرت خروجی افزایش پیدا میکند اما هزینه اتفاده از سوخت بالا میرود و از لحاظ اقتصادی هزینه بالایی را طلب میکند بجز اینکه از مبدل حرارتی استفاده شود.در شکل صفحه بعد یک سیکل با گرمکن مجدد نشان داده شده است.با توجه به انبساط آدیاباتیک میتوان گفت کل کار انجام شده برابر است با:

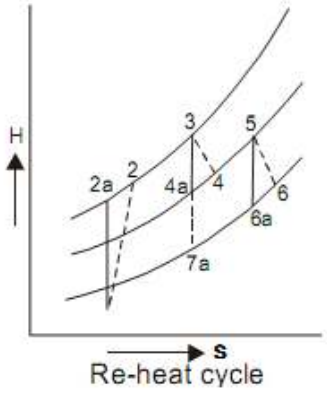
$$W_{net} = (T_3 - T_4) + (T_5 - T_6)$$

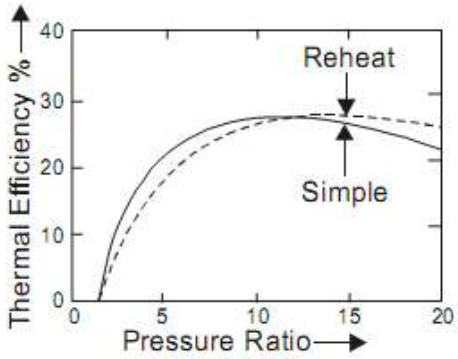
http://www.mohandes-iran.com

درسیکل گازی با گرم کردن مجدد گازها پس از خارج شدن از توربین اول در یک اتاق احتراق می توان کار بیشتری به دست آورد این سیکل شامل یک توربین دوطبقه است که قبل از هر طبقه یک اتاق احتراق قرار دارد و دمای گازی که در اثر انبساط در توربین اول کاهش یافته، دوباره افزایش می یابد و تقریباً به دمای اولیه که هنگام ورود به توربین گاز اولی داشته است رسانده می شود و وارد توربین دوم می گردد. با توجه به اینکه گاز خروجی از توربین اولی دارای حدود ۸۵٪ هوا می باشد می توان مقدار دیگری سوخت به داخل آن تزریق و احتراق را بدون نیاز به هوای رسانی جدید انجام داد. در سیکل گازی به همراه گرمکن مجدد، کار خالص در مقایسه با سیکل آرمانی بدون گرمکن بیشتر است، همچنین راندمان این سیکل نسبت به سیکل اصلی کمتر می باشد برای حداکثر شدن قدرت خروجی گرم کردن مجدد باید در نسبت فشار مناسب صورت گیرد. کار کمپرسور تحت تأثیر گرم کردن مجدد گاز قرار نمی گیرد. بنابراین برای حداکثر شدن قدرت خروجی، باید شرایط را تعیین نمود که در آن کار توربین حداکثر باشد.راندمان سیکل گرمایش مجدد کمتر از راندمان سیکل ساده است ولی به میزان ۳۵٪ قدرت خروجی بیشتر تولید می شود. این سیستم در سیکل گازی در حال بهره برداری قابل اجراء نمی باشد، با توجه به افزایش سوخت مصرفی، کاهش راندمان سیکل و هزینه بالای سرمایه گذاری آن روش مذکور در نیروگاه ها معمول نمی باشد، گرمای مجدد گازها در توربوجت ها می تواند کاربرد داشته باشد.

http://www.mohandes-iran.com







اگر گازهای حاصل از احتراق فقط در یک توربین منبسط می شدند کار انجام شده برابر بود با:

$$W_{net} = (T_3 - T_7)$$

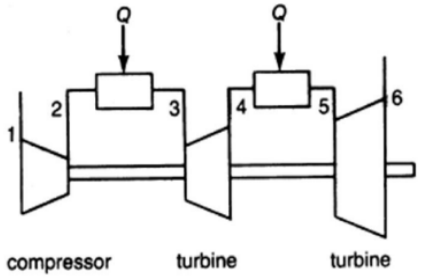
در حالت ایده آل دمای بعد از گرمکن باید با دمای ورودی توربین فشار بالا برابر باشد:

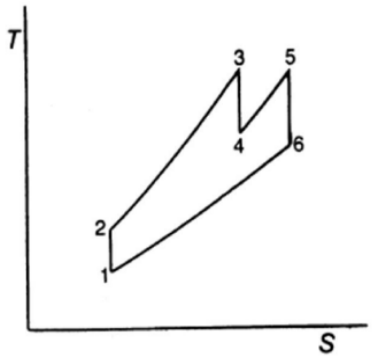
$$T_5 = T_3$$

برای محاسبه راندمان اینگونه عمل می کنیم:

$$\eta_t = \frac{(T_3 - T_4) + (T_5 - T_6) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2) + (T_5 - T_4)}$$

http://www.mohandes-iran.com





$W_{cyc} = W_t - W_c$ Reheat cycle and T–S diagram.

ب) بالا بردن حداکثر دمای سیکل: (دمای گاز ورودی توربین) این عمل به روشهای زیر انجام می شود:

۱- استفاده از سوختی با کیفیت بهتر

۲- استفاده از مولد بهتر برای پره های توربین که بتواند دمای زیادتری را تحمل کند.

۳- استفاده از روشهای خنک کردن پره ها

۴- اصلاح بازده توربین که بستگی به اصلاح طرح آن دارد.

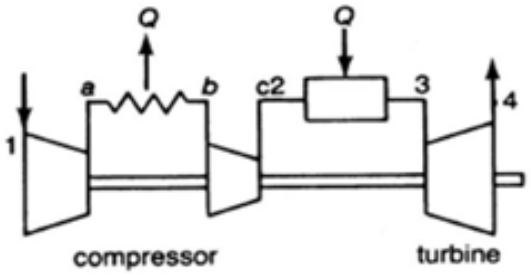
۳-کاستن از قدرت مصرفی کمپرسور:

این عمل به راههای زیر انجام می گیرد:

۱-خنک کردن میانی The intercooled gas turbine cycle:

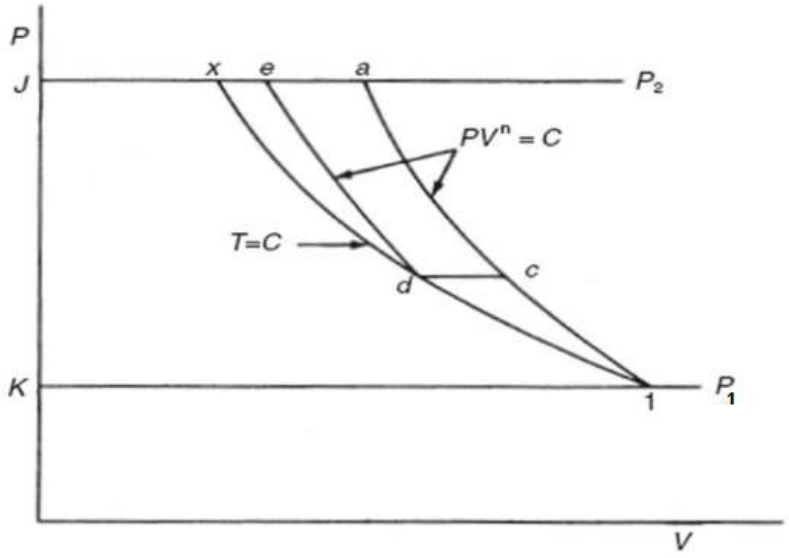
کار مصرفی کمپرسور با خنک کردن هوا در فاصله بین طبقات کمپرسور کاهش می یابد. استفاده از سیستم خنک کن میانی باعث افزایش کار خروجی سیستم خواهد شد ولی راندمان سیکل کاهش میابد هدف از اجرای سیستم خنک کن میانی کاهش کار کمپرسور است شکل صفحه بعد نشان دهنده یک سیکل توربین گازی با خنک کن میانی را نشان میدهد همراه با دیاگرام مربوط به تغییرات دمایی آن.

http://www.mohandes-iran.com



تاثیر خنک کن میانی بر کار $W_{cyc} = W_t - W_c$

خروجی:



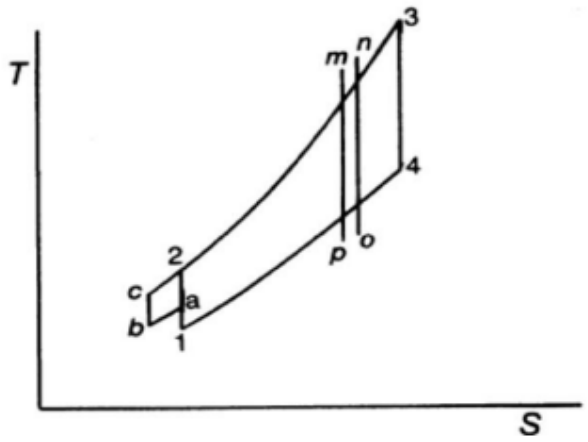
Multistages compression with intercooling.

شکل فوق نشان می دهد که کمپرسور طی یک فرایند پلی تروپیک از نقطه ۱ به نقطه a برسد.در اینصورت کار انجام شده بر روی کمپرسور برابر است با مساحت 1-a-j-k-1 حال اگر این فرایند را با استفاده از سیستم خنک کن میانی در دو مرحله انجام پذیرد یعنی در ابتدا فرایند 1-c و سپس d-e انجام پذیرد کار انجام گرفته بر روی کمپرسور برابر است با مساحت 1-c-d-e-j-k-1 . مساحت زیر منحنی PV برابر کار انجام شده بر روی کمپرسور است که در حالت دوم یعنی در حالتیکه از سیستم خنک کن میانی استفاده می گردد به اندازه مساحت c-a-e-d کمتر شده است بنابراین کار خالص

http://www.mohandes-iran.com

افزایش می یابد .بهترین فشار برای خنک کردن کمپرسور در این سیستم به صورت $P_{OPT}=\sqrt{P1P2}$ بدست می آید. که P_1 فشار هوای ورودی P_2 فشار هوای خروجی از کمپرسور است

تاثیر خنک کن میانی بر راندمان:



سیکل ساده توربین گازی عبارتست از 1-2-3-4-1 و سیکل مربوط به خنک کن میانی عبارتست از 1-a-b-c-2-3-4-1 . اگر دو سیکل را با استفاده از مدل سیکل کارنوت به سیکلهای کوچکی مانند p-m-n-o-p تقسیم کنیم داریم:

$$\eta_{CARNOT} = 1 - \frac{T_m}{T_p}$$

اگر گرمای ویژه ثابت باشد داریم:

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_m}{T_p} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

بنابراین همه سیکلهای کارنوت که مدل ساده ای از توربین گازی می باشند در محدوده 1-2-3-4-1 دارای راندمان برابر می باشند. ولی راندمان سیکلهای کارنوت در محدوده a-b-c-2-a کمتر از راندمانهای ذکر شده می باشد لذا راندمان سیکل با خنک کن میانی نسبت به سیکل ساده توربین گاز کمتر است

http://www.mohandes-iran.com

کار خالص سیکل توربین گاز را می توان با کاهش کار کمپرسور افزایش داد. این کاهش با به کار بردن چند کمپرسور و خنک کردن در بین طبقات عملی می گردد. هوای کمپرسور مرحله اول در داخل خنک کن میانی، تقریباً تا دمای اولیه خنک می شود و وارد کمپرسور بعدی می گردد. با استفاده از خنک کن میانی پرسه تراکم به پرسه ایزوترمال تبدیل می شود. تأثیر خنک کن میانی افزایش کار خالص و کاهش راندمان در مقایسه با سیکل ساده آرمانی بدون خنک کن میانی می باشد.

کار انجام شده به وسیله کمپرسور به سبب وجود خنک کن میانی صرفه جویی شده است و این همان مقدار کاری است که به کار خالص سیکل در مقایسه با سیکل اصلی افزوده می شود. همچنین راندمان (میزان مؤثر بودن خنک کردن میانی) نیز از رابطه زیر تعریف می شود:

$$\varepsilon_1 = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1}$$

اگر راندمان خنک کن ۱۰۰٪ باشد دمای هوای ورودی به کمپرسور (C_2) با دمای هوای ورودی کمپرسور اول مساوی می شود و هوای خارج شده از کمپرسول اول بدون تغییر دما وارد کمپرسور دوم می شود. بوسیله خنک کاری میانی کار خروجی در حدود ۳۰٪ افزایش خواهد داشت اما همانگونه که گفته شده راندمان کلی سیکل کاهش می یابد .

خنک کردن هوای متراکم شده در طبقات کمپرسور به چهار روش ممکن است:

۱- سرمایش سیال با استفاده از مبدل حرارتی سطحی بدون به کارگیری بازیاب حرارتی در این روش تنها گرمای هوای متراکم شده گرفته می شود.

۲- سرمایش سیال با استفاده از مبدل حرارتی سطحی و با به کارگیری بازیاب حرارت: در این روش نه تنها هوا خنک می شود بلکه از گرمای دریافتی از آن نیز استفاده می شود.

۳- تزریق آب بدون کمپرسور، در این روش آب در طبقات مختلف به داخل کمپرسور پاشیده می شود. هرچه مقدار مراحل پاشش آب به درون طبقات کمپرسور بیشتر باشد عمل تراکم به تراکم ایزوترمال

http://www.mohandes-iran.com

نزدیک تر می گردد. اما در عمل داشتن تعداد زیاد مراحل تزریق آب نیز غیر سودمند است. مسئله اصلی این روش، اندازه قطرات پاشیده شده به داخل کمپرسور است، قطرات ریزتر نرخ تبخیر بالایی دارند و در زمان کوتاهی تبخیر می شوند و برخورد قطعات درشت با پره های کمپرسور می توانند باعث فرسایش آنها گردد.

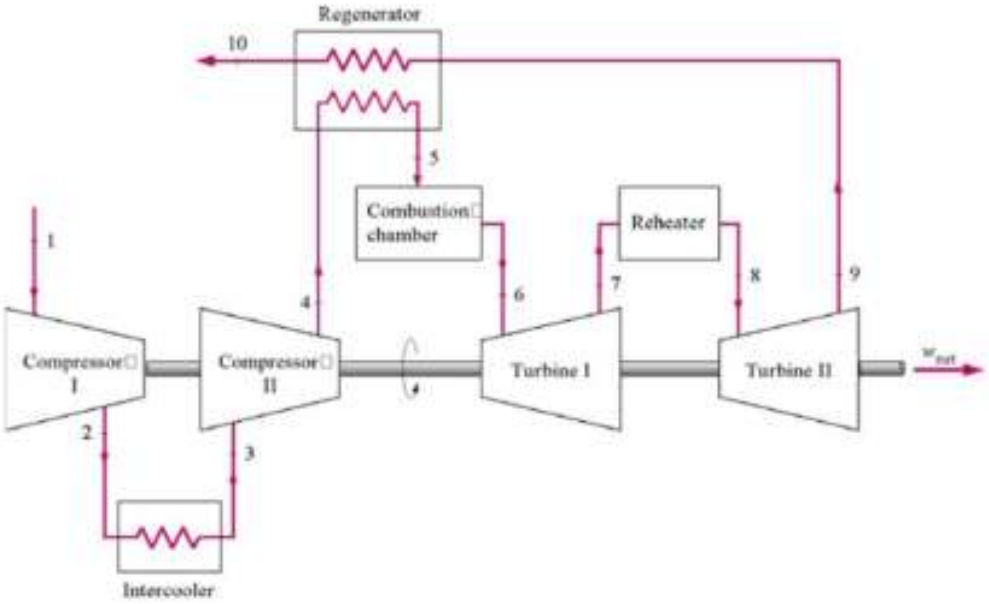
۴- تزریق متیل یا اتیل الکل به داخل کمپرسور به دلیل ارزش کالریک پایین اتیل یا متیل الکلها و آنتالپی بسیار بالای تبخیر آنها، تأخیر قابل توجهی در سرایش تبخیری داشته و موجب کاهش کار کمپرسور می گردد. از سوی دیگر با افزایش حجم گاز، کار مصرفی کمپرسور بیشتر می شود. اما تحقیقات نشانگر آن است که برای متانول و اتانول تأثیر سرمایش غلبه دارد و در مجموع کار مصرفی کمپرسور کمتر می گردد.

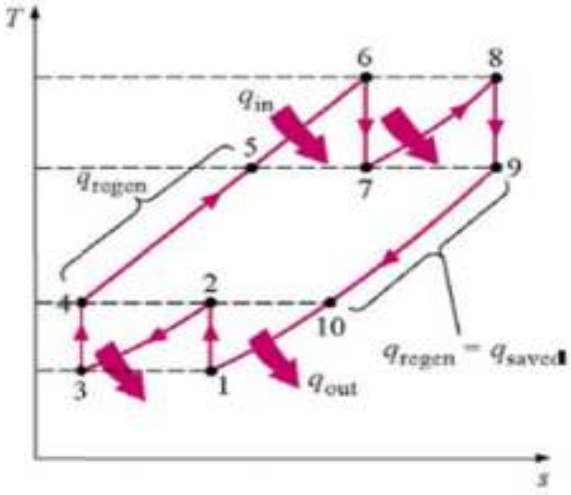
هزینه های اولیه نصب کمپرسور و خنک کن میانی میانی بالا می باشد. استفاده از چندین خنک کن میانی و چندین کمپرسور به جهت هزینه های سرمایه گذاری سنگین و هزینه های بالای مصرف انرژی و نگهداری آنها توصیه نمی شود .

http://www.mohandes-iran.com

سیکل توربین گاز با خنک کن میانی ،گرمکن مجدد و بازیاب حرارتی:

شکل زیر یک سیکل توربین گازی با خنک کن و بازیاب و گرمکن مجدد را نشان میدهد و به همراه آن منحنی تغییرات دمایی آن نشان داده شده است.





http://www.mohandes-iran.com

۲- خنک کاری تبخیری Evaporative Cooling:

با تزریق آب در دهانه ورودی کمپرسور، کار خروجی و بازده در اثر جرم اضافی آب تزریق شده و افزایش دانسیته هوا و خشک کردن هوا زیاد می شود .تزریق آب به سیکل توربین گازی روشی است که به وسیله آن می توان قدرت خروجی سیکل را به طور محسوسی و بازده آن را به طور جزئی افزایش داد. در بعضی از هواپیماها و در بعضی از واحدهای ثابت، آب به داخل کمپرسور تزریق می شود و ضمن افزایش دمای هوا در فرآیند تراکمی به صورت بخار در می آید از این رو گرمای تبخیر موجب کاهش دمای هوای متراکم می شود و در نتیجه آن کار کمپرسور کاهش می یابد. این اثر در واقع مشابه اثر خنک کن میانی است (که قبلاً مورد بررسی قرار گرفت.) تزریق آب به سیکل توربین گازی که دارای مبادله گرما است در صورتی که آب بین کمپرسور و مبادله گرما تزریق شود سودمندتر است. این روش را می توان به وسیله پاشش برای سیکل های تک محوری و دو محوری به کار برد . آب به اندازه ای می توانند تزریق شود که هوای متراکم در دمای T_3 به صورت اشباع درآید. بیش از این مقدار آب موجب می شود که مایع آب توسط هوا حمل شود و با این عمل هر چند که کار تا حدی افزایش می یابد ولی بازده در مقایسه با حالت هوای اشباع کاهش پیدا می کند و مشکلاتی مانند پرکار کردن مبادله کن گرما، اختلاف دمای شدید موضعی و تنش های گرمایی ناشی از آن بوجود می آید. افزایش کار نیروگاه در نتیجه تزریق آب تا حدی در نتیجه افزایش کار توربین به علت افزایش آهنگ جرمی جریان هوا و بخار آب از توربین است، بدون اینکه کار کمپرسور افزایش یافته باشد. مقدار افزایش جرم عبارت است از تفاضل جرم بخار اشباع و جرم بخار آبی که از اول در هوا موجود بود. از جمله عوامل مؤثر در میزان توان خروجی توربین گاز، دمای محیط است. این عامل به حدی تعیین کننده و تأثیرگذار است که افزایش آن به میزان یک درجه سانتیگراد موجب کاهش توان خروجی توربین به مقدار۶٪ تا ۹٪ درصد خواهد شد . یکی از راهکارهای مقابله با کاهش توان خروجی توربین گاز سرمایش هوای ورودی به کمپرسور است. پاشش آب در ورودی کمپرسور علاوه بر افزایش توان باعث کاهش آلاینده‌های NOx نیز می‌شود. بنابراین طبق گفته های قبل در این روش در این روش آب در کانال هوای ورودی به کمپرسور تبخیر می گردد.

http://www.mohandes-iran.com

بدین ترتیب گرمای نهان تبخیر آب از هوا گرفته شده و هوا خنک می شود. محدودیت اساسی این روش کاهش دمای ورودی، حداکثر تا دمای نقطه اشباع بخار یا نقطه شبنم است و مزیت آن هزینه اولیه و عملیاتی کمتر می باشد. شیوه فوق دارای دو روش عمومی است که عبارتست از :

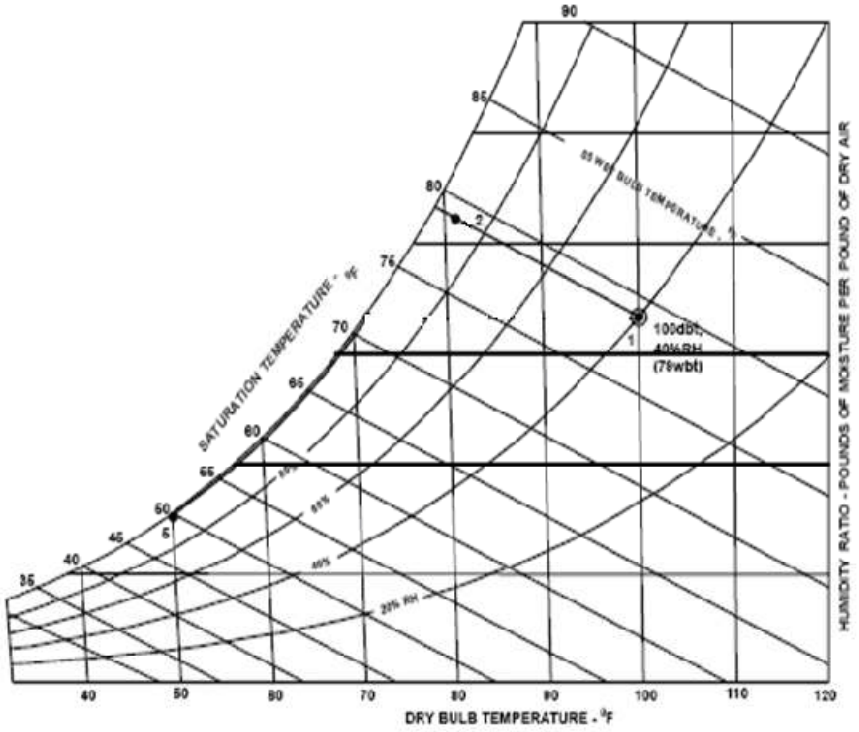
۱. اسپری مستقیم آب فشار بالا(High pressure fogging)
۲. خنک کاری تبخیری مدیا (Media Evaportive cooling)

پاشش آب به دلیل سادگی سیستم و تجهیزات به کار رفته در آن به سرعت در حال گسترش می باشد. به طوریکه امروزه محققان به دنبال راه حلهایی برای استفاده از این سیستم در مناطق با رطوبت بالا که امکان تبخیر آب بسیار پایین می باشد هستند. سیستم مه پاشی در مناطق گرم وخشک(fogging) میتواند بسیار مفید فایده باشد

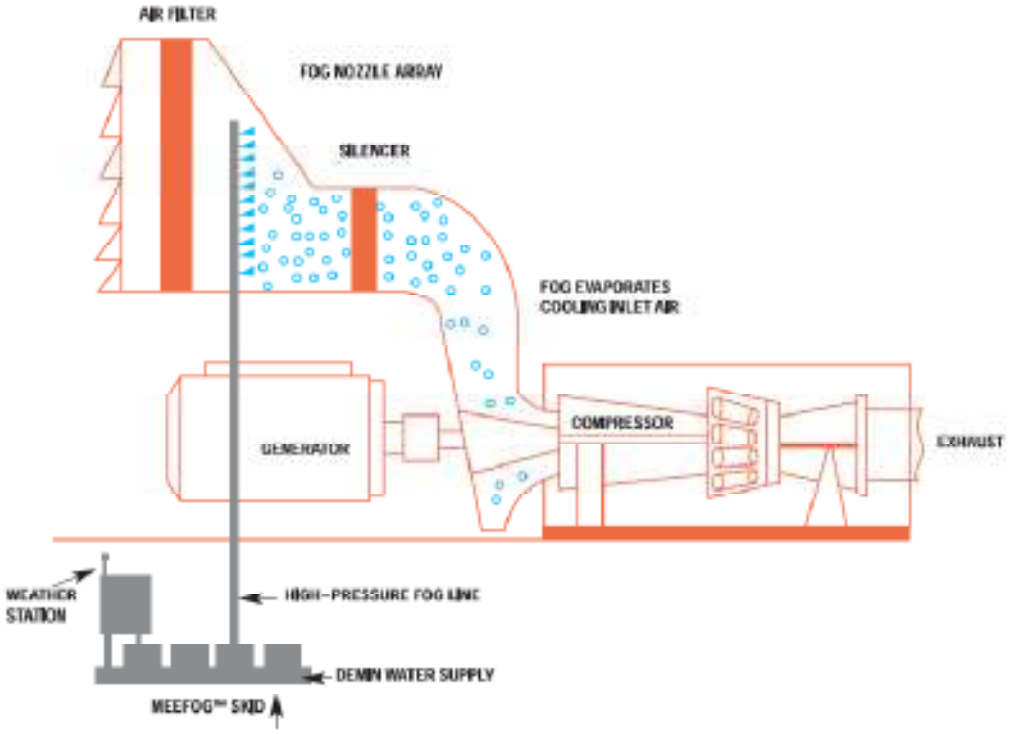
اسپری مستقیم آب فشار بالا(High pressure fogging) :

سیستم های ایجاد توده مه بوسیله پاشش آب با فشار بالا برای خنک کاری هوای ورودی به توربین گاز و در نتیجه افزایش توان خروجی آن از دهه ۱۹۸۰ تا به حال استفاده می شود .به طور کلی در سیستم خنک کننده مه پاشی (fogging) آب به صورت ذرات بسیار ریز مه در ابعاد میکرون در می آید و این جریان در معرض جریان هوا قرار داده می شود و هوای گرم حرارتش را به آب مایع می دهد و آب را به صورت بخار در می آورد .هنگامی که گرمای هوا به آب انتقال می یابد دمای هوا در طول خط ثابت دمای حباب تر کاهش می یابد (آنتالپی ثابت، بدون گرفتن یا از دست دادن گرما) و درهمین زمان است که رطوبت افزایش می یابد . این فرایند در نمودار سایکرومتریک صفحه بعد به صورت جابجایی از نقطه ۱ به ۲ مشهود است که در واقع نمایش کارکرد سیستم مه پاشی در نمودار سایکرومتریک است. باید اضهار داشت به طور کلی روشهای سرمایش دمای هوای ورودی برای طول روز عملکرد بهتری نسبت به طول شب دارد و همهٔ روشهای سرمایش موجب عملکرد بهتری برای طول روز خواهند شد.این روش راندمان را تا حدود ۳٪ افزایش میدهد و باعث کاهش حداکثری دما تا ۲۵ درجه میشود

http://www.mohandes-iran.com



فرایند تبدیل آب به ذرات مه بوسیله تعداد زیادی نازل و همچنین چندین پمپ صورت می پذیرد. در شکل زیر نحوه قرارگیری سیستم مه پاشی fogging در سیکل توربین گاز نمایش داده شده است.



http://www.mohandes-iran.com

در این روش با اسپری آب به ورودی کمپرسور توسط نازلهای مخصوصی درجه حرارت هوای ورودی را به طور محسوسی پایین آورده می شود. به طوری که باعث افزایش قدرت خروجی تا حد ۱۱٪ در سیکل ساده و تا ۷٪ در سیکل ترکیبی می شود. با خنک کردن هوا چگالی آن بیشتر شده و در نتیجه قدرت خروجی بالاتر می رود. اثر پاش آب به دو طریق انتقال حرارت و جرم می باشد یعنی آب و هوا در تماس با یکدیگر به علت اختلاف درجه حرارت و فشار مجاز با یکدیگر تبادل حرارت و جرم می نمایند در این پروسه حرارت از هوا به آب در حال تبخیر (انتقال حرارت) و بخار آب به هوا (انتقال جرم) منتقل می گردد. پاشش آب به ورودی کمپرسور توسط نازلها به نحوی می باشد که در آن از کویلهای گرم (Heating coil) برای کنترل رطوبت استفاده می شود. عدم توانایی این سیستم برای مناطق مرطوب به این دلیل است که اسپری کردن آب سرد یک فرآیند آنتالپی ثابت است.

خنک سازی به وسیله میلیون ها ذره آب تولید شده با اندازه ۴ تا ۶ میکرون انجام می شود. بر اساس آزمایشات انجام شده این سیستم حتی در رطوبتهای بالا راندمان ۱۰۰٪ دارد. قطرات آب (Fog) در هوا حرکت براوانی (Brownian) دارند. در هوای ساکن سرعت افتادن قطرات با اندازه ۱۰ میکرون، حدود یک متر در پنج دقیقه و قطرات با اندازه های بالای ۱۰۰ میکرون، حدود یک متر در سه ثانیه می باشد. این امر نشاندهنده مدت زمان باقی ماندن در هوا می باشد که رابطه مستقیم با قطر آن دارد .

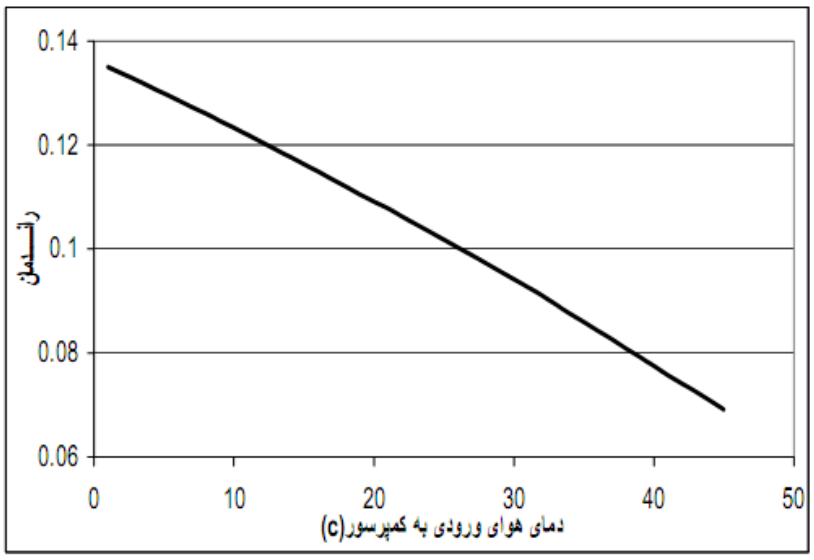
برای تولید مه از آب مقطر (Demineralized) با فشار بین ۱۰۰۰psi و ۳۰۰psi و نازلهای خاص استفاده می شود. با توجه به اهمیت اندازه قطرات تولیدی در افزایش راندمان تبخیر و جلوگیری از ساییدگی در کمپرسور نازلهای مورد استفاده به دقت طراحی و تست می گردند.

یکی از مسائل اساسی در استفاده از سیستم های تبخیری مسأله فرسایش پره های کمپرسور می باشد. این مشکل در سیستم مه پاش با توجه به مقطر بودن آب و کوچک بودن اندازه قطرات حل شده است. با استفاده از مه فشار بالا هیچ گونه رسوب یا فرسایشی روی پره ها حتی با ذرات بزرگتر هم مشاهده نشده است.

http://www.mohandes-iran.com

لازم به ذکر است یکی از نکات کلیدی در طراحی سیستم این است که دقت شود ذراتی که به کمپرسور می رسند حتماً تبخیر شده باشند. ذرات بالاتر از ۱۰ میکرون می توانند باعث فرسایش پره های کمپرسور شوند. هنگام استفاده از آب با کیفیت بالا علاوه بر عدم رسوب روی پره ها، شستشوی پره ها نیز انجام شود. این مسئله باعث کاهش افت قدرت ناشی از کثیفی پره های کمپرسور می شود. ذرات (Fog) آلودگی های هوای ورودی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهند. این در صورتی است که نازلها قبل از فیلتر هوا نصب شده و همچنین از یک جذب کننده قطرات برای خارج کردن آنها از سیستم و جلوگیری از رسیدنشان به فیلتر barriea استفاده شود. اگر نازلها بعد از فیلتر هوای ورودی نصب شوند، محل قرارگیری آنها برای جلوگیری از خیس شدن کف راکت بسیار مهم است. نازل باید قبل از صداخفه کن با جت مناسب نصب شوند. تا زمان کافی برای تبخیر تمام ذرات وجود داشته باشد. در قسمت بعد راجع به موقعیت قرارگیری نازلها صحبت می شود.

کارآیی این سیستم رابطه معکوس با رطوبت هوا دارد. رطوبت نسبی هوا در اوایل صبح و هنگام غروب بالاترین مقدار و در اواسط روز کمترین مقدار را دارد. بنابراین سیستم می تواند در طول روز کارآیی بسیار خوبی در خنک سازی هوا داشته باشد .نمودار زیر تاثیر تغییرات دما بر راندمان را نشان می دهد این نمودار بر اساس راندمان واقعی توربین گاز پالایشگاه خانگیران است.



رابطهٔ دمای هوای ورودی به کمپرسور و راندمان توربین گازی

http://www.mohandes-iran.com

مزایای سیستم:

- عدم نیاز به فضای زیاد جهت نصب نازلها و سایر تجهیزات

- عدم نیاز به تغییر ساختار اطلاق فیلتر

- قابلیت خنک کردن سریع هوای ورودی به علت ریز بودن ذرات آب

- ایجاد افت فشار کمتر در هوای ورودی نسبت به سایر سیستم های خنک کن

- هزینه سرمایه گذاری و نصب بسیار کمتر نسبت به سایر سیستم ها

- زمان نصب بسیار پایین (در حدود ۱ الی ۲ روز)

- مصرف آب کمتر نسبت به سایر سیستم های تبخیری

- امکان ایجاد رطوبت ۱۰۰٪ در هوای ورودی

- افزایش راندمان کمپرسور

- کاهش میزان NOx تولیدی

- قیمت پایین تمام شده برای تولید هر کیلووات حداکثر ۳۰ دلار

معایب این سیستم عبارتند از:

- نیاز به آب مقطر

- تغییر منحنی عملکرد کمپرسور و نزدیک تر کردن آن به surge

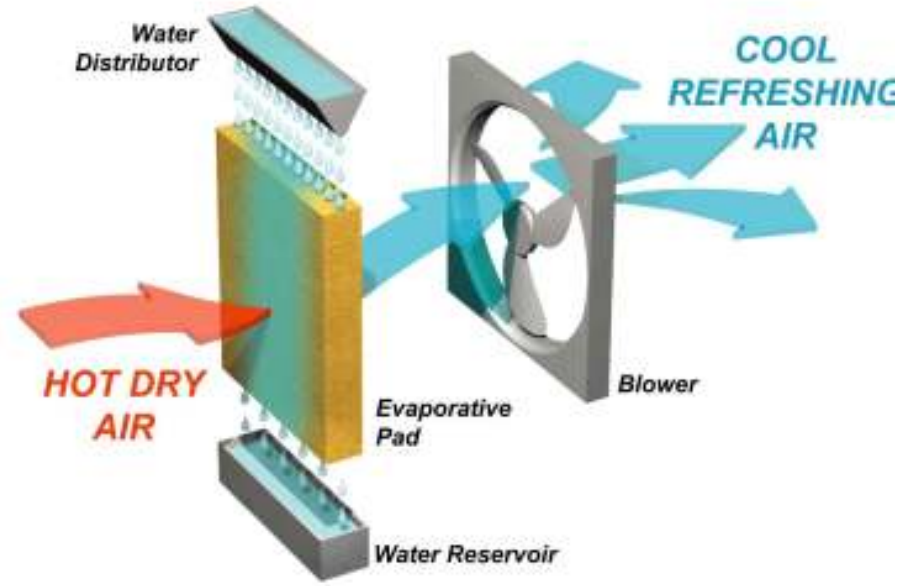
- عدم کارایی لازم در مناطق با رطوبت بسیار بالا

- مصرف آب بیشتر نسبت به سایر روشهای خنک کاری غیر تبخیری

http://www.mohandes-iran.com

خنک کاری تبخیری مدیا (Media Evaportive cooling):

همانطور که پیشتر گفته شد، یکی از روشهای مؤثر در افزایش قدرت خروجی توربین گازی خنک کاری هوای ورودی می باشد. عمل خنک کاری هوا در سیستم تبخیری بر اساس تبخیر آب و جذب گرمای هوا می باشد. برای تبدیل یک پوند آب از حالت مایع به بخار حدود ۱۴۱۰BTU انرژی حرارتی مورد نیاز است این حرارت از هوای محیط به آب منتقل خواهد شد. از مشکلات اساسی روش تبخیری، ارتباط مستقیم هوا با آب می باشد. در مورد سیستم Fog آب به صورت پودر درآمده و اختلاط و تبخیر آن تقریباً ۱۰۰٪ می باشد. اما در روش (Media) نحوه ارتباط آب با هوا متفاوت می باشد. نحوه عملکرد سیستم مدیا را نشان می دهد. آب پس از عبور و خیس کردن سطوح مدیا در پایین کولر جمع شده و به تانک ذخیره تخلیه می شود. هوای ورودی به کمپرسور نیز از میان صفحات مدیا عبور کرده و تا حد اشباع آب موجود را تبخیر می کند. سرعت هوای عبوری از روی این صفحات نباید از حد معینی بالاتر باشد چرا که ممکن است در سرعت های بالا قطرات آب از روی سطوح جدا شده و باعث خرابی پره های کمپرسور گردند. البته بعد از سیستم کولر تبخیری هوای سرد از یک جاذب رطوبت عبور می کند تا قطرات احتمالی آب جذب شوند.



http://www.mohandes-iran.com

نقطه کار کولر تبخیری بر اساس دمای محیط روی کنترل کننده کولر قابل تنظیم می باشد. کولر در دمای بالاتر از این نقطه فعال خواهد بود. نقطه کار نباید در دمای پایین تنظیم گردد. چرا که اگر سیستم دما را بیش از حد کاهش دهد. امکان تشکیل یخ وجود خواهد داشت اگر دمای محیط به زیر صفر برسد کل سیستم تبخیری برای جلوگیری از اثرات یخ زدگی از آب تخلیه می گردد. یخ زدگی باعث ایجاد ترک در سطح مدیا می شود. صفحات مدیا از جنس فیبر سلولزی بوده و به صورت موج دار ساخته می شود. یک مجموعه از صفحات در کنار یکدیگر، تشکیل یک کولر تبخیری مدیا که به صورت لانه زنبوری است می دهند. این سطوح خاصیتی مشابه خاصیت فیتیله در مکش سیالات دارند و آب در سطح مدیا پخش می شود. راندمان یک کولر تبخیری مدیا به صورت زیر تعریف می شود:

$$E = \frac{T_1 DB + T_2 DBS}{T_1 DB - T_{WB}}$$

در رابطه فوق اندیس ۱ برای دماهای ورودی، اندیس ۲ برای خروجی DB مخفف Dry Bulb و WB مخفف Wet bulb می باشد. راندمان سیستم مدیا ۸۰ تا ۹۰ درصد است بنابراین میزان کاهش درجه حرارت محیط توسط کولری با راندمان ۹۰٪ از رابطه زیر به دست می آید:

$$ATDB = 0.90 \times \left(T_{1DB} - T_{1WB}\right)$$

در سیستم های تبخیری، اصلی ترین عامل محدودکننده در کاهش دما میزان رطوبت موجود در هوا می باشد. به طوری که این سیستم ها در هوای با رطوبت بسیار بالا تقریباً کارآیی خود را از دست می دهد به طور معمول سیستم مدیا در هوای گرم با رطوبت پایین خروجی توربین را حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد و در رطوبت بالا حدود ۱۰ درصد افزایش می دهند. بطور متوسط قدرت توربین حدود ۰/۴ درصد به ازای هر درجه فارنهایت کاهش در هوای ورودی افزایش می یابد و حدود ۰/۷ درصد به ازای هر درجه سلسیوس افزایش می یابد.

http://www.mohandes-iran.com

بیشترین کاربرد سیستم مدیا در مناطق گرم و خشک می باشد در این نواحی پیدا کردن آب بدون املاح تقریباً غیرممکن است. اگر این آب مستقیماً جایگزین آب تبخیر شده گردد به تدریج غلظت املاح موجود در آب افزایش یافته و امکان رسوب این املاح بر روی سطوح مدیا می باشد. در نتیجه خرابی و از کار افتادگی سطوح و همچنین امکان نفوذ ذرات رسوب به هوا و آسیب رساندن به قطعات دوار توربین و کمپرسور وجود خواهد داشت.بنابراین بطور پیوسته، در حدی از آب به عنوان بلودان (BlowDown) از تانک ذخیره آب گرفته شده و غلظت مواد موجود در آن کنترل می شود. دبی جرمی آب جبرانی برابر مجموع دبی آب بلودان و آب تبخیر شده در سطوح مدیا خواهد بود.

معایب و مزایای سیستم مدیا:

- افزایش قدرت خروجی توربین
- بهبود راندمان حرارتی
- بازگشت سریع سرما
- قیمت سرمایه گذاری پایین
- هزینه های تعمیر و نگهداری سالیانه کم
- افزایش عمر فیلتر خشک (در صورت قبل از آن)
- کاهش شدید مقدار Nox تولیدی
- سادگی سیستم و تجهیزات
- میرایی اغتشاشات جریان

معایب سیستم مدیا:

- سرعت هوا هنگام عبور سطوح مدیا باید پایین باشد.
- در مناطق با رطوبت بالا، محدودیت افزایش قدرت وجود دارد.
- در سیستم های تبخیری متد اول به دلیل پایین بودن راندمان و کاهش زیاد افت فشار هوا، هرگز حداکثر خنک کاری انجام نمی شود.

http://www.mohandes-iran.com

شرایط استاندارد کاری توربین گازی :

شرایط استانداد محیطی و ترمودینامیکی یکی ازمهمترین عوامل مؤثر بر راندمان توربین های گازی می باشد. سازمان جهانی استاندارد (ISO) شرایط استاندارد مشخصی را برای کارکرد توربین های گازی تعریف نموده است که مهمترین آنها عبارتند از:

- دمای خشک ۱۵ درجه سلسیوس
- دمای تر ۷.۲ درجه سلسیوس
- رطوبت نسبی ۶۰ درصد است
- فشار محیطی 1 atm
- عدم افت فشار در قسمتهای ایزوبار

تحقیقات بدست آمده بیانگر این واقعیت است که با دور شدن از شرایط استاندارد راندمان سیکل کاهش می یابد.

تأثیر متغیرهای کار روی بازده:

بازده حرارتی سیکل ساده واقعی یک توربین گاز بستگی به متغیرهای زیر دارد:

۱-بازده توربین η_t

۲-دمای ورودی توربین T_3

۳-دمای ورودی کمپرسور T_1

۴-بازده کمپرسور η_C

۵-نسبت فشار $(r_P) = \frac{P_2}{P_1}$

http://www.mohandes-iran.com

تأثیرات دمای ورودی توربین و فشار آن:

افزایش دمای ورودی توربین بازده حرارتی را با ثابت نگهداشتن عوامل دیگر، افزایش می دهد. به ازاء هر دمای ورودی توربین یک نسبت فشار عالی برای حداکثر بازده حرارتی وجود دارد.

تأثیر بازده توربین و کمپرسور:

بازده حرارتی در برابر تغییرات بازده توربین و کمپرسور بسیار حساس است. وقتی بازده توربین و کمپرسور زیاد می شود. بازده حرارتی سیکل هم زیاد می شود. به ازاء هر بازده توربین و کمپرسور یک حد اعلای فشار وجود دارد که به ازاء آن بازده حرارتی سیکل حداکثر می شود.

تأثیر تغییرات دمای هوای ورودی به کمپرسور:

با کاهش دمای هوای ورودی کمپرسور (هوای محیط) بازده سیکل افزایش می یابد. نقاط حد اعلا در نسبت فشار بالاتر بوجود می آید و هرچه انحنای منحنی کمتر بشود حدود وسیعتری برای بهترین نسبت فشار وجود دارد.

کار در توربین و کمپرسور:

مقدار کار در دستگاه هایی مانند کمپرسور یا توربین با استفاده از معادله زیر است:

$$W = -\int_1^2 vdp$$

این معادله برای گاز کامل با توجه به اینکه برای آن pv=Mrt است بصورت زیر در می آید:

$$W = -\int_1^2 mRT\,\frac{dP}{P}$$

http://www.mohandes-iran.com

بنابراین به ازاء $\frac{dP}{P}$ معین مقدار کار مستقیماً با دما متناسب است، لذا کمپرسور که بین حالت ۱ و ۲ کار می کند با افزایش دما کار بیشتری مصرف خواهد کرد از آنجا که کار کمپرسور منفی است افزایش آن کار خالص سیکل را کاهش می دهد، بهتر است در حالی که می خواهیم به فشار P_2 برسیم $T=T_2-$ T_1 را در حد پایین نگاه داریم، این کار را از لحاظ نظری می توان با خنک کردن متوالی گاز متراکم و نگهداشتن دمای آن در حد T_1 انجام داد. اما این کار از لحاظ فیزیکی امکان پذیر نیست و خنک کردن گاز را بین دو مرحله تراکمی می توان انجام داد. با توجه به معادله $W = -\int_1^2 mRT \frac{dP}{P}$ می توان نتیجه گرفت که با بالا نگهداشتن دمای گاز در توربین می توان کار توربین را افزایش داد .

تزریق بخار به محفظه احتراق:

روش تزریق بخار در سالهای اخیر در موتورهای رفت و برگشتی و توربین های گازی کاربرد پیدا کرده است. در این روش بخار سوپرهیت تولیدی در یک بویلر را با فشار معادل فشار اتاق احتراق توربین گاز به درون آن تزریق می کنند این امر موجب افزایش آهنگ جریان جرمی گذرنده از توربین و همچنین افزایش گرمای ویژه محصولات احتراق که نتیجه آن افزایش توان و بازده سیکل می باشد.

از نظر ماهیتی سیکل تزریق بخار توربین گاز ترکیبی از سیکل برایتون و سیکل رانکین می باشد که در آن، بخار و هوا به جای آنکه در دو توربین مجزا منبسط شوند فقط در یک توربین مشرک انبساط می یابند. بخار موردنیاز معمولاً از بازیافت حرارت دود خروجی توربین گاز در یک بویلر بازیافت تولید می گردد. چون درجه حرارت آب پاشیده شده از درجه حرارت داخل محفظه احتراق پایین تر می باشد، موجب خنک تر شدن محفظه احتراق می شود. بنابراین بدون افزایش درجه حرارت محفظه احتراق سوخت بیشتری در سیکل سوزانده شده و توان خالص سیکل افزایش می یابد. تزریق بخار به ورودی توربین گاز یا به خروجی کمپرسور انجام می گیرد که در ادامه هر دو روش بررسی می گردد.

http://www.mohandes-iran.com

تزریق بخار به انتهای اتاق احتراق:

در این روش بخار با فشار حدود ۳۰ بار و بصورت سوپرهیت به ورودی توربین گاز بعد از محفظه احتراق تزریق می شود. به علت افزایش دبی جرمی گازهای عبوری از توربین توان خروجی آن بدون افزایش مصرف سوخت افزایش می یابد. در نتیجه راندمان کلی سیکل افزایش خواهد یافت. همچنین تزریق بخار باعث خنک کاری پره های توربین می شود این روش ساده بوده و هزینه سرمایه گذاری و نگهداری پایینی دارد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد شکل (۵-۱) دیاگرام تولید و تزریق بخار به ورودی توربین گاز را نشان می دهد. در سیکل معمولی توربین گازی جهت خنک کاری پره های توربین از هوای متراکم قبل از محفظه احتراق استفاده می گردد. این مسأله موجب کاهش راندمان سیکل و کار توربین می گردد ولی در سیکل پاشش بخار چون بخار آب پاشیده شده به توربین دارای درجه حرارت پایینی است (حدود ۴۳۰°C) لذا عمل خنک کاری پره های توربین را نیز انجام می دهد و در نتیجه نسبت به حالت معمولی راندمان و توان تولیدی توربین افزایش می یابد.

مطالعات انجام شده نشان می دهد که استفاده از سیکل پاشش بخار به ورودی توربین گاز مزایای زیادی در سیکلهای تولید همزمان برق و حرارت دارد. راندمان سیکل ساده گازی به همراه پاشش بخار تا حدود ۴۹٪ و با در نظر گرفتن اثرات خنک کاری پره ها توسط پاشش بخار تا ۵۲٪ قابل افزایش است

توربین گاز با تزریق بخار به خروجی کمپرسور:

در این روش از بخار جهت تزریق به خروجی کمپرسور استفاده می شود. به این ترتیب که بخار در هوای خروجی کمپرسور تزریق شود و در نتیجه دبی جرمی عبوری از توربین افزایش پیدا می کند. چون بخار بعد از کمپرسور تزریق می شود لذا کار مورد نیاز کمپرسور افزایش نمی یابد. بخار بعد از کمپرسور، ولی قبل از مشعل تزریق می شود و مخلوط مناسبی ایجاد می کند. بنابراین درجه حرارت اولیه در اتاق احتراق کاهش پیدا کرده و همچنین میزان NOx خروجی کم می شود.

http://www.mohandes-iran.com

مزایا و معایب روش تزریق بخار:

از معایب تزریق بخار به سیکل توربین گاز، هدر رفتن آب یا بخار تزریق شده و مساله خوردگی می باشد. این مشکلات با استفاده از سیکل VODOLET قابل حل می باشد اجزاء اصلی سیکل VODOLET عبارتند از توربین گاز به همراه (FLOW-PART) بویلر بازیاب، لوله های و تجهیزات مربوط به تزریق بخار تولید شده به توربین می باشد.

سیکل VODOLET دارای FLOW-PART خاص در توربین می باشد. یعنی سطح جریان به طور خاص تغییر یافته تا مساحت لازم جهت عبور همزمان بخار و محصولات احتراق در توربین گاز فراهم آید و محفظه احتراق نیز به شکل خاصی طراحی شده است.

مزیت این سیکل در استفاده از یک کندانسور تماسی آبی نصب شده در خروجی بویلر می باشد. هدف از کندانسور، کاهش حرارت گازهای خروجی از بویلر، پایین آوردن نقطه شبنیم کندانسه کردن، کنترل و جمع آوری آب از ترکیب بخار و گاز خروجی می باشد.

مزیت استفاده از سیکل VODOLET آن است که نه تنها باعث برطرف شدن عیب فوق می شود بلکه در شرایط خاص آب تولید شده از فرآیند احتراق، رطوبت محیط و همچنین آب حاصل از چگالش بخار تزریقی توسط کندانسور به سیکل اضافه می شود. همچنین آزمایشات مختلف و مکرر نشان داده است که خوردگی نیز اتفاق نمی افتد. از مزایای روش تزریق بخار به سیکل توربین گازی به شرح زیر می باشد:

۱- تولید اکسیدهای نیتروژن به میزان کم و ناچیز

۲- عدم وابستگی شرایط عملکرد و راندمان سیکل به عوامل محیطی

۳- اشغال فضای کم

۴- هزینه پایین تعمیرات و نگهداری

هزینه تبدیل سیکل توربین گاز با تزریق بخار کم بوده و حدود صد دلار برای هر کیلووات افزایش یافته می باشد، همچنین پیاده کردن این سیستم نیاز به تغییرات اساسی در سیکل ندارد.

http://www.mohandes-iran.com

اثرات فیلتر هوا بر روی قدرت تولیدی توربین گاز :

هوای مورد نیاز جهت توربین گاز می‌بایست کاملاً تمیز بوده و از ذرات معلق در فضای اطراف خود پاک باشد. در محیط، معمولاً ذرات معلق زیادی وجود دارد که به نسبت ارتفاع از سطح زمین قطر آنها کمتر می‌شود. وجود این ذرات در مسیر عبور خود از توربین گاز مشکلات زیادی را برای کارکرد دستگاه بوجود می آورند.در مواقع طوفانی و در حالی که گرد و خاک زیادی در هوای اطراف ما وجود دارد مقدار و تعداد این ذرات بیشتر خواهد شد با توجه به اینکه ورود این ذرات به توربین گاز میتواند مشکلات زیادی برای توربین گازی و کارکرد آن ایجاد کند از این‌رو ، تمامی توربین های گاز مجهز به سامانه های فیلتر متعددی جهت تمیز کردن این هوای ورودی هستند که به مجموعه آنها Air Intake گفته می شود. در این سامانه‌ها چند ردیف فیلترهای مختلف جهت جلوگیری از ورود قطعات بزرگ تا کوچک وجود دارد که بطور کلی شامل سه ردیف می‌باشند:

1-ردیف اول؛ فیلترهای توری با مش بزرگ

2- ردیف دوم؛ فیلترهای فلزی

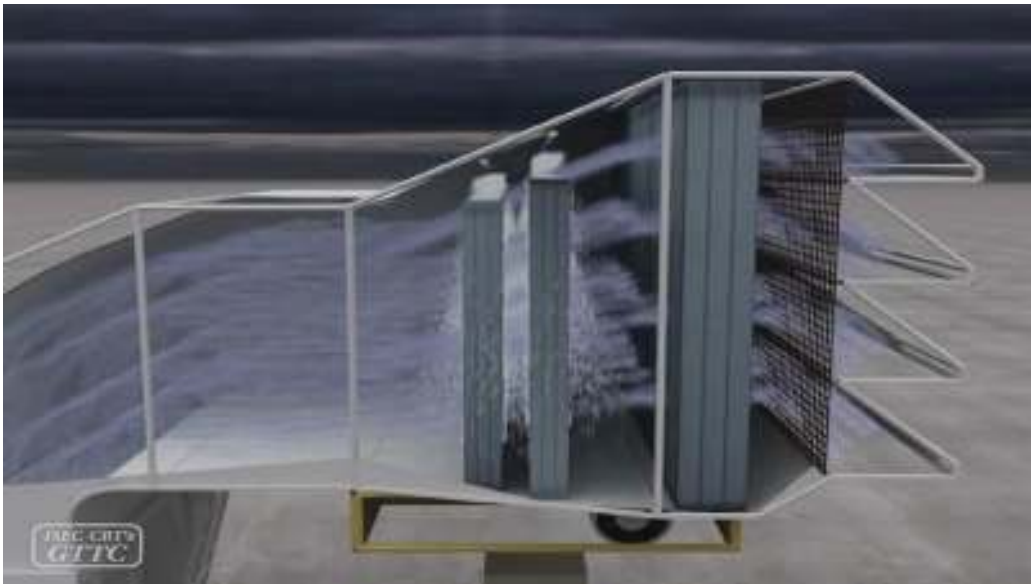
3- ردیف سوم؛ فیلترهای اصلی که عمدتاً کاغذی یا پارچه‌ای هستند

در ردیف اول سامانه ورودی هوا از تورهایی با مش بزرگ جهت جلوگیری از ورود قطعات بزرگ مانند پرنده ها و خس و خاشاک استفاده می شود عموما طراحی این فیلترها بگونه ای است که در صورت وجود باران از مکیدن آب به داخل air intake جلوگیری می کند.

در ردیف دوم که فیلترهای فلزی قرار میگیرند که در آن ذرات عبوری در اثر دوران داخل فیلترها به اطراف کانال عبور هوا منتقل شده واز مسیر عبور هوا خارج می گردد.

http://www.mohandes-iran.com

ردیف سوم مرحله فیلتر اصلی است که در آن عموما از فیلترهای کاغذی ویا پارچه ای استفاده میشود تا از عبور ذرات دارای قطر بزرگتر از ۵۰ میکرون جلوگیری کند این فیلترها عموما بعد از مدتی جرم گرفته و کثیف می شوند و به علت ایجاد اختلاف فشار زیاد در مسیر جریان هوا تعویض ویا تمیز کردن آنها الزامی است. شکل زیر نمایش یک دریچه ورودی هوای توربین گازی با سه ردیف فیلتر و سیستم Fog



در صورت کثیفی بیش از حد فیلترهای هوا و عدم تمیز کردن آنها برای مدت طولانی ممکن است کمپرسور دچار کمبود هوا یا خفگی شود .بنابراین بعد از فیلترهای اصلی دریچه های اضطراری تعبیه میشود که با افزایش اختلاف فشار دو طرف فیلترها به شکل وزنی باز شده و هوای محیط بطور مستقیم وارد کانال ورودی کمپرسور می شود .در این حالت ، همزمان دستور توقف واحد نیز صادر می گردد.با توجه به آنچه گفته شد تمیز کردن به موقع فیلترهای هوا از اهمیت ویژه ای برخوردار است، به همین منظور برای تمیز کردن فیلتر های *Air Intake* از روش های دستی و یا خود کار استفاده می شود.

در روش های دستی پس از ظهور آلارم مربوطه، واحد متوقف شده و فیلترهای کثیف خارج و فیلترهای تمیز جایگزین می شود.

در بعضی از توربین ها با استفاده از یک کمپرسور هوا با فشار بالا به پشت فیلترهای فلزی وارد شده و با اعمال ضربه های منظم سبب جدا شدن ذرات گرد و خاک از فیلترها می گردد .نهایتاً این گرد و خاک توسط مجاری ویژه و با استفاده از یک فن به نام *pulse filter fan* ، از منطقه فیلترها خارج می شود.

http://www.mohandes-iran.com

در بعضی از توربین‌ها به منظور پاک‌کردن فیلترهای ردیف دوم از Pulse Filter Fan ها استفاده می‌گردد که با اعمال ضربه‌هایی به این فیلترها سبب می‌گردند تا سطوح فیلترها پاک شوند.

همچنین در ورودی هوا سیستم‌های مختلفی وجود دارند که از آن میان می‌توان به سیستم‌های Fog و Anti Icing نام برد. امروزه آگاهی در رابطه با بهبود سیستم پاکسازی و تصفیه هوای ورودی به توربین گاز(Turbine air Filteration) رشد فزایندهای یافته است.به طورساده میتوان گفت که فیلتر و تمیز کردن هوای ورودی به کمپرسور، نقش بسیار مهمی در عملکرد توربینهای گازی ایفا میکند. هنگامی که هوای ورودی به کمپرسور کاملاً تصفیه و پاک باشد، کمک زیادی به تولید برق باراندمان بالا، کرده به عبارتی دیگر توان توربین را بالا خواهد برد و برای شرایط ارایه شده هر قدر هوا تمیز تر باشد، قدرت تولیدی گاز بیشتر خواهد بود. سه مشکل اساسی و مهم که هوای کثیف میتواند برای توربینهای گاز به وجود آورد عبارتند از:

ساییدگی(Erosion)پرهها، کثیف شدن (Fouling) کمپرسور و گرفتگی راهگاههای خنک کنندگی در پرهها. شرایط فوق باعث میشود که راندمان توربین گاز، کاهش یابد که نتیجه آن کاهش تولید برق و در انتها کاهش در سود نیروگاه، است. علاوه بر آن، صدمات و خسارات مالی نیز به قسمتهای دوار مخصوصاً پرههای توربین، کمپرسور و ... وارد میشود.

اصول فیلتراسیون توربین گاز

طراحی فیلترهای هوای ورودی به توربینهای گاز باید به صورتی انجام شود که دو اصل مهم راندمان فیلتراسیون و کمترین مقدار افت فشار را در حال تعادل نگاه دارد.توربینهای گاز باید طوری طراحی شوند که کمترین انرژی برای مکیدن هوا از بیرون، توسط توربین گاز مصرف شود. بنابراین در حالی که فیلترهای توربین گاز بیشترین ناخالصیهای موجود در هوا را باید تصفیه کنند (راندمان بالای فیلتراسیون) کمترین افت فشار در مرحله مکش هوا باید وجود داشته باشد. کاهش در افت فشار سیستم

http://www.mohandes-iran.com

فیلتر هوای ورودی باعث میشود که توربین گاز، انرژی کمتری برای مکیدن هوا مصرف کند که نتیجه آن، انرژی زیادتر تولیدی، خواهد بود.نیاز به متعادل کردن دو عامل فوق، زمانی قابل درک است که در دو حد نهایی عمل فیلتراسیون حرکت کنیم. به عنوان مثال، یک ورق فولادی، بیشترین راندمان فیلتراسیون را دارد زیرا هیچگونه ناخالصی از میان آن عبور نمیکند. ولی متاسفانه حرکت هوا در مقابل صفحه فولادی، متوقف میشود.در مقابل، یک تور ماهیگیری هیچگونه مقاومتی در مقابل عبور هوا نشان نمیدهد ولی راندمان فیلتراسیون تور ماهیگیری تقریباً صفر است.بنابراین برای یک سیستم فیلتراسیون ایده آل باید یک تعادل کامل بین دو هدف متقابل در یکدیگر یعنی راندمان فیلتراسیون و افت فشار کم را به وجود آورد.

ذرات کوچک ولی با صدمات زیاد:

هرچند که گردوغبار و سایر ذرات موجود در هوا، ابعاد کوچکی دارند ولی میتوانند صدمات زیادی به توربین گازوارد کنند.پرههای کمپرسور و توربین گاز طوری طراحی و ساخته شدهاند که یک گذرگاه جریان هوای آیرودینامیکی بسیار دقیق و حساس بوجود بیاورند. هر عاملی که در جریان یافتن هوا به صورت آیرودینامیکی دخالت کند، میتواند باعث کارکرد بیشتر توربین گاز برای حرکت گاز شود که موجب افت راندمان میشود. محورهای توربین گاز قطور است (بطور معمول ۱ تا ۱.۵ متر قطر دارند) ضمن آنکه این محورها در دورهای بالا (چند هزار دور در دقیقه) کار میکنند.با در نظر گرفتن عوامل فوق، میتوان دید که اصابت مداوم ذرات موجود در هوا به پرههای کمپرسور و توربین در حالی که با سرعت زیاد در حال حرکت است باعث وارد آمدن صدمات زیادی به پرهها میشود .بنابراین میتوان نتیجهگیری کرد که عمل فیلتراسیون از نظر نگهداری کمپرسور و توربین و از دیدگاه راندمان، بسیار مهم است.ساییدگی Erosion مشکلی است که بر اثر برخورد ذرات بزرگ (ذراتی که از اندازه ۱۰۰ میکرون و بزرگتر ساخته شدهاند) با پرههای کمپرسور و توربین به وجود آمده و باعث تخریب پرههای کمپرسور و توربین میشود. به عنوان مورد حاد، میتوان از ساییدگیهای زیاد در پرهها، نام برد، به عنوان مثال در یک مورد در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی در رابطه با سیستم فیلتراسیون استائیک با درب کنارگذر (by pass

http://www.mohandes-iran.com

(doorمیتوان یاد کرد که در این حادثه درب کنارگذر بر روی هوای

فیلتر نشده که از کویر در هنگام طوفان میآمد باز شده بود که بر اثر آن تمام پرههای توربین گاز کاملاً از بین رفتند.حادثه فوق گویای این مطلب است که بر اثر فیلتر نکردن هوا میتوان پرههای توربین را کاملاً از بین برد. امروز با استفاده از سیستمهای پیشرفته فیلتراسیون میتوان خطر ساییدگی را از بین برد.

هماکنون سازندگان فیلتر در حال مطالعه و تحقیق بر روی اثرات مخرب ذرات بسیار ریز (۵ میکرون و کوچکتر) بر روی پرهها هستند. ذرات کوچک، باعث خوردگی پرهها، کثیف شدن کمپرسور و گرفتگی راهگاههای خنککننده پرههای توربین میشود.خوردگی در محلهایی که ذرات همراه با مواد یا بخارات شیمیایی معلق در هوا با فلز پره توربین گاز ترکیب شود باعث خسارت به پرهها میشود.

کثیف شدن کمپرسور بر اثر جمع شدن اجسام ریز بر روی پره در قسمت پایین دست کمپرسور بهوجود میآید که باعث کاهش شدید راندمان سیستم توربین و افزایش نرخ حرارتی (Heat Rate) توربین گاز و در نتیجه افزایش مصرف سوخت میشود. گرفتگی در راهگاههای خنک کننده پرههای توربین یکی دیگر از مشکلات فیلتراسیون است که باید مورد بررسی قرار گرفته و برطرف شود. پرههای توربین گاز در محیطی قرار دارند که بسیار داغ است. هوای فشرده پس از ورود به اطاق احتراق و ترکیب با سوخت و انجام عمل احتراق بصورت دود با درجه حرارت بسیار بالا از منطقه احتراق خارج شده و به پرههای توربین برخورد میکند. بنابراین محیطی که پرههای توربین گاز در آن قرار دارد بسیار گرم است.

برای خنککردن پرههای توربین گاز از هوای فشرده برگرفته از کمپرسور توربین گاز استفاده میشود. پرههای قسمت توربین طوری طراحی شدهاند که راهگاههای بسیار ریزی در داخل آنها تعبیه شده که هوای خنک از داخل آنها عبور کرده و پره را خنک میکند.

بدون یک سیستم فیلتراسیون مناسب، ذرات ریز موجود در هوا میتواند راهگاههای خنک کننده را بسته و باعث گرم شدن بیش از حد پرهها شود که خسارتهای بسیار سنگینی به پرهها وارد خواهد شد. هرچند که اکثر توربینهای گاز، دارای حسگرهایی است که هنگام بالا رفتن درجه حرارت پرهها به حد خطرناک باعث تریپ)ایست ناگهانی) توربین گاز میشود ولی ادامه این عمل باعث کاهش عمر توربین گاز میشود.

http://www.mohandes-iran.com

نوع و طبیعت ناخالصیها

انواع زیادی ناخالصی در هوا وجود دارد که باعث صدمه زدن به سیستمهای توربین گاز میشود، این ناخالصیها توسط چشم غیرمسلح، قابل دیدن نیست.به عنوان مثال، اجسام معلق در دود حاصل از احتراق هیدروکربنها (سوختهای فسیلی) در موتورهای احتراق داخلی در طیف اجسام زیرمیکرون و جزو کوچکترین اجسام آلودهکننده محیط است. خاصیت و طبیعت چسبندگی این اجسام باعث میشود که این اجسام در طبقه بندی از نوع بسیار آسیبدهنده قرار گیرند.

دیگر اجسام معمول آلوده کننده که باعث اثرات منفی بر روی توربین گاز میشود شامل غبار،رطوبت (مه)، ذرات ریز یخ (Frost) و دود است.

رطوبت / مه:

یکی دیگر از عواملی که بر روی عملکرد فیلترها اثر دارد، وجود رطوبت و مه است.مناطق ساحلی به دلیل نزدیکی به دریا و یا اقیانوس در طول سال، دارای هوای مرطوب بوده و در بسیاری از موارد مه آلود است. رطوبت، تاثیر منفی بر روی سطوح فیلترهای هوا دارد و در مناطقی مانند شمال غرب اقیانوس پاسیفیک.، مناطق با مه و رطوبت بالا مانند سواحل خلیج فارس (نیروگاههای گازی چابهار، بوشهر، بندرعباس) و سواحل شمال دریای خزر (مانند نیروگاه نکا) و نیز در آمریکا و مناطقی مانند خاورمیانه، هندوستان و انگلستان اثرات رطوبت بر روی فیلترها بسیار محسوس است .معمولاً بسیاری از طراحان فیلترهای هوای ورودی به توربین گاز برای کاهش رطوبت در هوا از یک سیستم پیش فیلتراسیون استفاده میکنند. توسط این سیستم، مقداری از رطوبت هوا، گرفته میشود تا فیلتر اصلی هوا بتواند ذرات موجود در هوا را تصفیه کند.

http://www.mohandes-iran.com

راندمان واحد گازی در مقایسه با واحد بخار، کمتر است. امروزه راندمان توربین گاز حدود ۳۰٪ است و راندمان توربین بخار امروزی ۳۵٪ است. لذا برای افزایش راندمان، می‌توان از سیکل ترکیبی استفاده کرد. در سیکل های ترکیبی از گازهای داغ خروجی مجددا در چرخه استفاده می شود و به این طریق بازده گرمایی کلی توربین افزایش می یابد.

از آنجا که توربین گاز یک موتور حرارتی است هرقدر حرارت تولید شده در عمل احتراق بیشتر باشد ، انبساط گازها بیشتر خواهد شد و در نتیجه قدرت و راندمان بیشتری می‌توان کسب نمود. ولی به علت محدودیتهای موجود در زمینه متالوژی بکار رفته در ساخت پره‌های توربین گاز در عمل نمی‌توان اجازه داد که درجه حرارت بخش‌های داغ (Hot Section) بیش از اندازه بالا رود. در حدود ٪۷۵ از حجم هوای مصرفی صرف تعدیل درجه حرارت در اتاق‌های احتراق و بخش توربین یک واحد گازی می‌گردد و این موضوع عیب عمده توربین گازها نسبت به انواع دیگر مولدهای انرژی (توربین بخار و ...) می‌باشد. که البته این مسئله با ترکیب نمودن واحدهای گازی با واحدهای بخار (نیروگاه‌های سیکل ترکیبیCombined Cycle) وبه کار گرفتن انرژی خروجی از اگزوز توربین گاز، انرژیی که تلف می‌شد تا حد چشمگیری جبران شده است.

http://www.mohandes-iran.com

فصل پنجم

کاربرد توربین گازی

Gas turbine applications

http://www.mohandes-iran.com

مقدمه :

در گذشته توربین گازی در مقایسه با سایر منابع تولید قدرت بعنوان مولدی که دارای راندمان خوبی نیست قلمداد می‌شد. زیرا راندمان آن حدود ۱۵٪ بود، ولی علی‌رغم پایین بودن راندمان مزایایی چون کوچک بودن، وزن کم و سرعت نصب بالا، در بسیاری از موارد کاربرد توربین گاز را توجیه می‌کرد. عمده‌ترین عامل محدود کننده در مورد اغلب توربین های گازی، درجه حرارت ورود گاز به توربین می‌باشد. با طرحهای جدیدی که در رابطه با خنک کاری ابداع گردیده و همچنین پیشرفت‌هایی که در زمینه متالوژی پره‌ها حاصل شده دماهای بالاتری برای گازهای با دماهای بالاتری در توربین به دست آمده است.

کاربردهای توربین گازی در صنعت، به طور کلی به دو شاخهٔ اصلی تقسیم می شود.

الف- توربینهایی که در صنعت هواپیمایی استفاده می شود؛

ب- توربینهایی که در سایر صنایع به کار برده می شود.

این دو گروه به دلیل متفاوت بودن از نظر کاربری، نکات متمایزی را در طراحی توربین گازی به وجود می آورند. موارد زیر را به عنوان شاخصهای اصلی می توان نام برد:

الف- اجزای توربینهای گازی صنعتی معمولاً برای حدود یکصد هزار ساعت کار طراحی می شود در حالی که برای توربینهای صنایع هواپیمایی، شاخصهای دیگری مطرح است.

ب- ابعاد هندسی و وزن، برای توربینهای گازی صنعتی اهمیت زیادی ندارد، اما توجه به این دو مشخصه در طراحی توربینهای گازی مورد استفاده در صنایع هوایی حائز اهمیت است؛

ج- از انرژی جنبشی دود خروجی توربینهای صنایع هوایی، استفاده می شود، در حالی که در توربینهای صنعتی، این انرژی تلف می گردد. لذا لازم است انرژی جنبشی تولید شده در توربینهای گازی صنعتی، تا حد ممکن کاهش یافته و کنترل گردد.

http://www.mohandes-iran.com

تفاوتهای این دو نوع توربین گازی، بیشتر در سیستم یاتاقان، محفظه، احتراق برای مصرف سوخت های ارزان قیمت، توربین قدرت و سیستم کاهش سرعت برای بهره‌برداری در بارهای پایین است. اگرچه موارد ذکر شده تفاوتهایی اساسی را در طراحی به وجود می آورد اما سرمایه گذاری و نتایج تحقیقات انجام شده در صنایع هواپیمایی، در سایر صنایع مرتبط با توربینهای گازی صنعتی نیز، بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. طوری که با اصلاحات و تغییرات انجام گرفته روی مدلهای مختلف، انواع پیشرفته تر و با کارایی بالاتری طراحی و ساخته می شود. تفاوتهای این دو نوع توربین گازی، بیشتر در سیستم یاتاقان، محفظهٔ احتراق مناسب برای مصرف سوختهای ارزان قیمت، توربین قدرت و سیستم کاهش سرعت برای بهره برداری در بارهای پایین است.

با توسعه توربینهای گازی و پیشرفت روزافزون بهره وری آنها استفاده از توربینهای گازی روز به روز بیشتر مورد توجه قرار گرفت. به حدی که هم اکنون در بسیاری از شاخه های صنعتی و خدماتی حضور توربینهای گازی خودنمایی مینماید.

کاربرد در صنایع هوایی:

موتورهای جت:

این نوع متورهای توربینی همانگونه که از اسمشان مشخص است دارای توربین گازی هستند که گاز با دما و فشار بالا ایجاد می‌کند و سپس با عبور گاز از یک توربین قدرت انرژی مورد نیاز را تأمین می‌نماید. پس در این نوع توربین ها موتور جت در حقیقت مولد گاز می‌باشد. از این نوع توربین ها می‌توان موتور هواپیما را نام برد که در آنها چند مرحله به کمپرسور اضافه می‌شود تا بتواند فشار بالای مورد نیاز را تأمین نماید. در این نوع توربین ها برای بالا بردن فشار گاز خروجی از محفظه احتراق و ورودی به توربین قدرت تا فشار 45-75 psi (4-5 bar) و درجه حرارت 900-1200F، از ژنراتورهای گازی استفاده می‌شود.

http://www.mohandes-iran.com

بیشتر هواپیماهای مدرن امروزی جهت تولید نیروی تراست(نیروی جلوبرنده) لازم برای حرکت، از موتورهای توربین گازی استفاده میکنند.

اصطلاح "Gas Turbine" به عنوان یک واژه ی عمومی برای انواع موتورهای توربینی مورد استفاده قرار میگیرد و در محدوده ی موتورهای جت شامل: توربوجت، توربوفن، توربوپراپ، توربوشفت و کلیه موتورهای توربینی که با مکانیزم جت کار میکنند میشود. از سایر سیستم های پیشرانشی که با شتاب سیال، تراست تولید میکنند ولی توربینی نیستند میتوان به: رمجت، اسکرمجت، پالس جت، پرشرجت، واترجت و موتورهای راکتی اشاره کرد که هر کدام با مکانیزم و اصولی جدا کار میکنند و ساختمانی متفاوت از یکدیگر دارند .

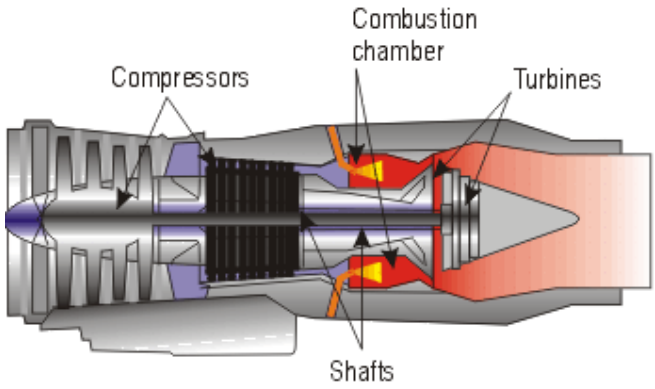
موتورهای توربینی گونه های مختلفی دارند و با وجود اینکه هر یک از آنها متفاوت از دیگری است اما دارای قسمتهای مشترکی هستند .همه ی موتورهای توربینی دارای یک مجرای ورود هوا، یک کمپرسور یا متراکم کننده، یک بخش احتراق، یک توربین و یک مجرای خروجی هستند. همه ی این موتورها با یک اصول اساسی کار میکنند ولی هر کدام از آنها دارای مزایا و اشکالات مجزایی هستند. همه موتورهای توربینی جت با این قاعده کار میکنند :هوا به داخل لوله مانندی کشیده و فشرده شده، با سوخت مخلوط و سوخته شده با سرعت بالایی خارج میشود.

کلید ساختن یک موتور جتی که کار کند در فشرده سازی هوای ورودی آن است. چنانچه کمپرس صورت نگیرد، مخلوط هوا و سوخت قادر نخواهد بود هیچ ازدیاد حجم و تراستی تولید کند. بیشتر جت ها دارای کمپرسوری هستند شامل پره های گردنده و در قسمتی که کمپرس صورت میگیرد حرکت هوا جهت ایجاد فشار زیاد، کند میشود. این هوای کمپرس شده به داخل محفظه ای که در آن احتراق صورت میگیرد رانده شده و با سوخت مخلوط شده و سوزانده میشود. در حین اینکه گازهای پرفشار در حال خارج شدن هستند از میان توربینی شامل پره های قوس دار زیادی میگذرند .در اینجا گازهای

http://www.mohandes-iran.com

خروجی پره های توربین را به حرکت در می آورند و این توربین نیز از طریق یک شفت (محور) به کمپرسور در قسمت جلوی موتور متصل است و باعث گرداندن پره های کمپرسور میشود.

به این طریق گازهای خروجی محفظه ی احتراق، توربین را و توربین نیز کمپرسور را گردانده تا هوای بیشتری گرفته و فشرده شود و موتور به سیکل کاری خود ادامه دهد. کارکرد موتورهای توربینی مداوم است یعنی بدون وقفه کار میکنند و هیچ وقفه ای ندارند.

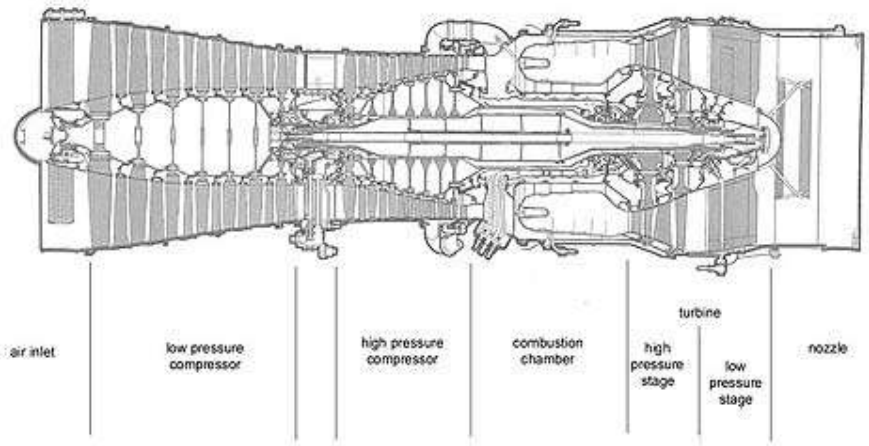


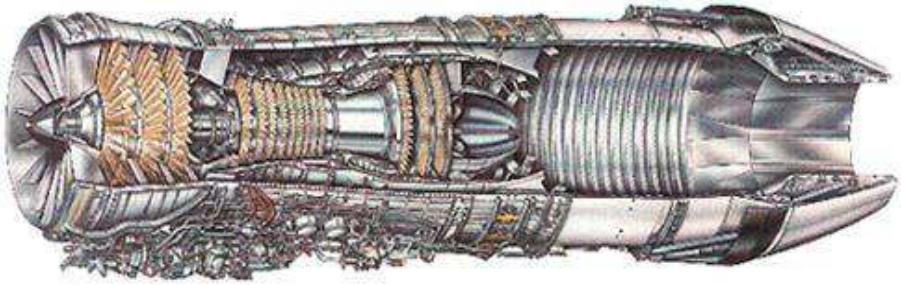
در حقیقت، تمام موتورهای جت که توربین دارند، نوع پیشرفته تری از همان موتورهای توربین گازی هستند که در زمانهای دورتر استفاده می شده است. از موتورهای توربین گازی بیشتر برای تولید برق نه تولید نیروی رانش استفاده می شود. موتورهای جت کلاً بر پایه ی موارد زیر کار می کنند: هوا از مدخل وارد موتور جت شده و سپس با چرخاندن توربین نیروی لازم را برای مکش هوا برای سیکل بعدی آماده کرده و خود از مخرج خارج می شود. در این حالت فشار و سرعت هوای خروجی، بدون در نظر گرفتن اصطکاک، با سرعت و فشار هوای ورودی برابر است. سیکل کاری موتورهای جت پیوسته است، این بدین معناست که هنگامی که هوا وارد کمپرسور می گردد، به سوی توربین عقب موتور رفته و آن را نیز همراه با خروج خود به حرکت در می آورد، یعنی نیروی لازم برای مکش در حقیقت به وسیله توربین انتهایی موتور تولید شده است و بدین گونه است که همزمان با ورود هوا به کمپرسور، توربین نیز به وسیله نیروی تولید شده توسط سیکل قبلی در حال چرخش است و نیروی آن صرف چرخاندن کمپرسور می

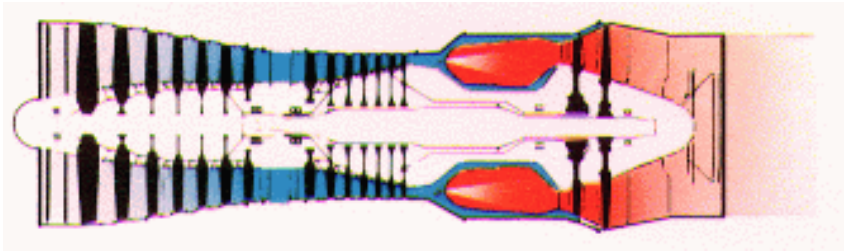
http://www.mohandes-iran.com

شود. در این فرآیند، دوباره نیروی تولید شده توسط این سیکل به توربین داده شده و توربین نیروی لازم جهت ادامه کار را فراهم می آورد.

بنابراین در حقیقت تمامی موتورهای جتی که دارای توربین هستند توربین گاز Gas Turbine نامیده می‌شوند ولی اصطلاح توربین گاز بیشتر به موتورهای جتی داده می‌شود که هدف استفاده از آنها تولید رانش نیست بلکه چرخاندن توربین و اکثراً برای تولید برق است و برخی اوقات در طراحی و نحوه قرار گرفتن توربین ها و نازل با انواع دیگر موتور جت تفاوت عمده‌ای دارند







http://www.mohandes-iran.com

موارد کاربرد توربین گازی درسایر صنایع:

توربین گازی در صنایع نفت و گاز:

به دلیل اهمیت و نقش توربین های گازی به عنوان مولد نیرو در بخش صنعت نفت و استفاده وسیع از آن در این بخش و نیاز مبرم به پشتیبانی و تأمین قطعات یدکی آنها و با توجه به اینکه قسمت زیادی از این قطعات از خارج از کشور وارد می‌شود، تولید این محصول اساسی درداخل کشور یک امر ضروری می‌باشد.

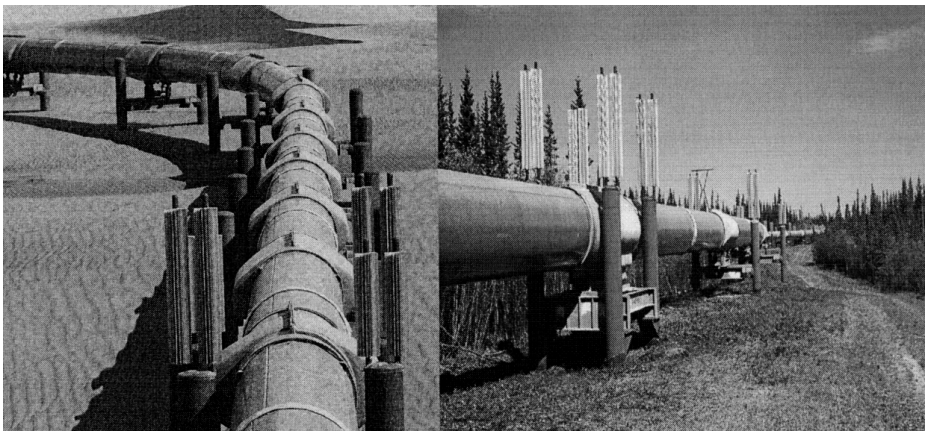
از توربین های گازی به عنوان نیروی محرکه یا پمپ یا کمپرسور استفاده می‌شود و این نکته را نیز باید در نظر داشت که انتقال فرآورده‌های نفتی از طریق خطوط لوله در مقایسه با دیگر راههای انتقال مثل جاده یا راه آهن از توجیه اقتصادی برخوردار بوده و هزینه کمتری را دربردارد. در مقایسه با انواع دیگر توربین ها، توربین های گازی نیاز به سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیرات کمتری دارد و در مدت زمان کوتاه تری به بهره‌برداری می‌رسد. تلفات حرارتی از عیوب عمده در این توربین ها می‌باشد که ترکیب سیکل های نیروگاهی از راه حل های پیشنهاد شده برای رفع این نقیصه است.

صرف نظر از کاربردهای نظامی این توربین ها، در ذیل موارد کاربرد مهم آنها در صنایع نفت و گاز بیان شده است:

http://www.mohandes-iran.com

انتقال و پمپ کردن نفت و گاز:

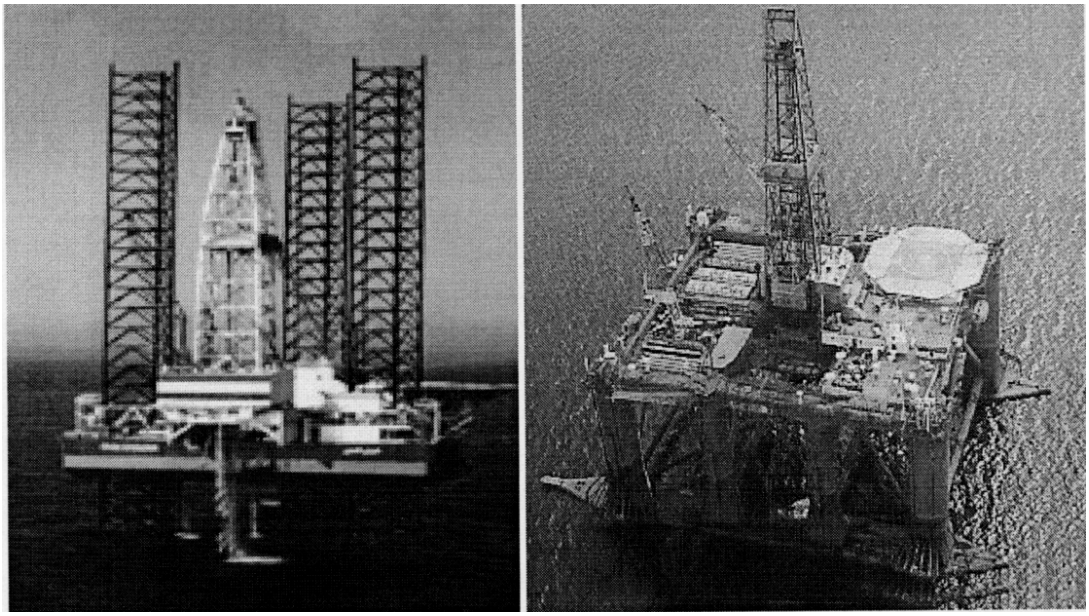
اکتشاف نفت و گاز معمولاً در صحرا یا دریا و به دور از مراکز تولید برق انجام می‌گیرد. در این حالـت، از توربین گازی به عنوان موتور پمپ یا موتور کمپرسور برای انتقال نفت و گاز از صحرا، دریا یا منـاطق دور افتاده به مراکز مورد نیاز مانند مراکز صنعتی یا بنادر استفاده می‌شود. در ابتدای خط لوله، حدود ۷ تا ۱۰ درصد کل گاز، در توربین، برای افزایش فشار مصرف می‌شود. در سال های اخیر به دلیل افزایش مصـرف گاز، سیستم های پمپ کردن با کارایی بالاتری طراحی شده است. در این سیستم ها از توربین هایی که قابلیت مصرف سوخت تصفیه نشده را داشته باشند برای انتقال و پمپ کردن استفاده مـی‌شـود، کـه در مقایسه با انتقال سوخت از طریق جاده و راه آهن هزینه کمتری دارد.



http://www.mohandes-iran.com

پشتیبانی فشار مخازن :

از قدرت توربین گازی برای گرداندن کمپرسورهای فشار قوی و برای پشتیبانی و حفظ فشار مخازن نفت در موقع استخراج استفاده می شود. این کار معمولاً با تزریق آب انجام می شود. نوع خاصی از توربین گازی محرکه پمپ که دارای حجم کمتر و مشخصاتی ویژه است، در سکوهای نفتی برای استخراج نفت حتی در عمقهای بسیار زیاد، به کار می رود

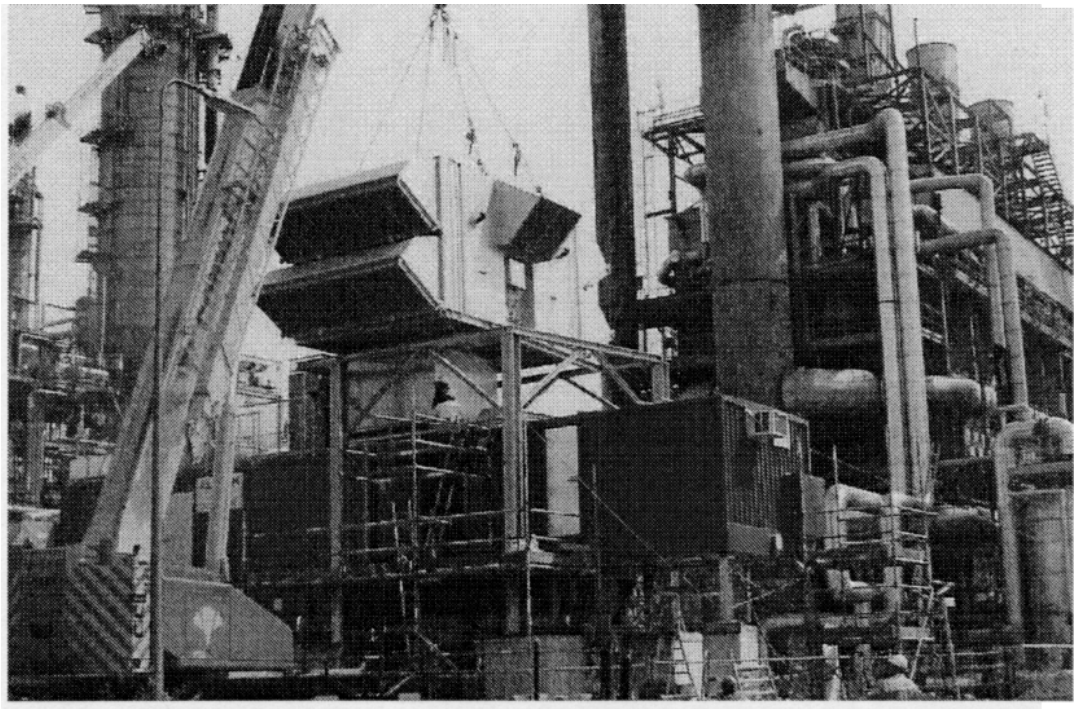


تصفیه و پالایش

استفاده از توربین گازی که قدرت محرکه ژنراتور ـ کمپرسور را تأمین می‌نماید در بخش تصفیه و پالایش چند مزیت دارد. به عنوان مثال توربین گازی را به عنوان موتور دستگاه‌های مکانیکی در این صنعت به کار می‌برند. هوای فشرده‌ای که از کمپرسور خارج می‌شود در سیستم ها به مصرف می‌رسد. انرژی حرارتی گازهای خروجی توربین که حاوی حدود ۸۰ درصد اکسیژن نیز می‌باشد، برای مصارف مختلفی به کار می‌رود.

http://www.mohandes-iran.com

علاوه بر موارد فوق، به دلیل قابلیت مصرف سوخت های مختلف، به ویژه گازهای حاصل از واکنش ها که معمولاً تلف می‌شود در توربین گازی استفاده می‌گردد. در نتیجه، مصرف کنندگان واحدهای توربین گازی در صنعت پالایش، چندین برابر می‌شوند.



توربین گاز پالایشگاه سرخون:

گاز طبیعی مورد نیاز این پالایشگاه از طریق ۱۴ حلقه چاه موجود در منطقه تأمین می شود - اخیراً نیز قرار است که حلقه چاههای شماره ۱۵ و ۱۶ نیز به این مجموعه اضافه شوند- و پس از انجام فرآیندهای تفکیک، شیرین سازی و نمزدایی بر روی آن، آماده انتقال به مبادی مصرف می گردد. انجام این فرآیند های اصلی که در طراحی و تجهیز آنها از آخرین اطلاعات و فناوری استفاده شده است، توسط واحد های شیرین سازی، نم زدایی، بازیافت گلایکول، تبرید با پروپان، تثبیت مایعات و تولید گاز مایع و ... میسر می گردد. تولید انرژی برق در این تأسیسات توسط توربین های گازی موجود که مجموعاً ۷/۲

http://www.mohandes-iran.com

مگاوات ظرفیت را دارا هستند، انجام می‌گیرد. گاز طبیعی تولید شده علاوه بر تأمین نیازهای مصرف نیروگاه بندرعباس، پالایشگاه نفت بندرعباس و صنایع تولیدی استان هرمزگان، مصارف خانگی و صنعتی استان کرمان نظیر مس سرچشمه، شهرهای سیرجان، کرمان، رفسنجان و ... راتغذیه می نماید که در آینده به این تعداد افزوده خواهد شد.

کاربرد توربین بخار در پالایشگاه:

کمپرسورهای گریز از مرکز ذاتاً ماشین‌های پر دوری هستند و بهترین گردانندهٔ آنها توربین بخار است. از آنجا که آنها را برای دورهای همسنگ دور بالای توربین طراحی می‌کنند، می‌توان آنها را مستقیماً کوپله کرد. جایی که بخار پرفشار باشد، توبین به منزلهٔ شیرفشار شکن عمل می کند و بخار کم فشار خروجی از توربین می تواند برای گرمایش یا مقاصد دیگر به کار رود. ولی در بسیاری از کاربردها، خصوصاً در ظرفیتهای پایین، کمپرسورها را موتورهای برقی می گردانند که به جعبه دنده های افزاینده مجهزند. در تأسیسات کمپرسور گریز از مرکز، اگر توربین بخار در دسترس باشد از نظر اقتصادی ترجیح دارد، زیرا تجهیزات و نیروی کار لازم برای چنین تأسیساتی در مقایسه با آنچه برای کمپرسور دوار با توربین گازی مشابه لازم است، نسبتاً کوچکتر و کمتر است. دلیل آن عمدتاً جمع و جوری و سبکی دستگاهها نسبت به قدرت مصرفی است. به علاوه کمپرسور گریز از مرکز فقط بخش کوچکی از فضای لازم برای تجهیزات تبرید را اشغال می کند. واحدهای تبرید نوع گریز از مرکز در ظرفیتهای ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ تن و برای کار موتور برقی، توربین بخار و یا موتور درونسوز تولید می شوند.

سیستم تبرید در پالایشگاه گازسرخون :

سیستم تبرید پالایشگاه گازسرخون شامل یک کمپرسور توربین رستون و یک پاور توربین می‌باشدکه بصورت سری هم محور قرارداده شده اند، دور کمپرسوراولی ۷۰۰۰دور بردقیقه می باشد که با یک گیربکس به ۹۰۰۰دور افزایش پیدا میکند وبه پاور توربین متصل می شود.

http://www.mohandes-iran.com

نمایی از توربین رستون

مجموعه توربوکمپرسورهای پروپان

این مجموعه شامل سه ردیف کمپروسر به صورت موازی می باشد که هر ردیف می تواند بطور مستقل عمل نموده و گاز پروپان متراکم نماید

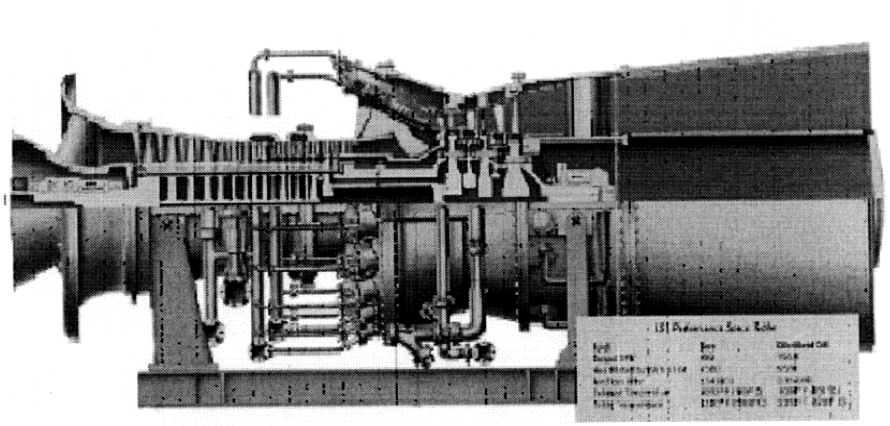
با توجه به تولید گاز ممکن است در بعضی موارد دو ردیف همزمان در سرویس قرار گیرند تجهیزات اصلی در مجموعه عبارتند از کمپرسور الیوت مدل M9–729 و توربین گازی مدل TB –4000 ساخت شرکت رستون.

نمایی از توربو کمپرسورهای واحد ۵۰۰ پالایشگاه سرخون

http://www.mohandes-iran.com

توربین گازی در صنایع حمل و نقل :

از توربین گازی در انواع کشتی های بزرگ و کوچک مسافربری و باربری استفاده می‌شود. در دهه ۱۹۷۰ به دلیل افزایش قیمت سوخت، کشتی های بزرگ باربری، سیستم های توربین گازی خود را با موتورهای دیزلی جایگزین کردند. چون سرعت در این نوع کشتی ها مشخصه مهمی نبود در نتیجه این نوع کشتی ها، سرعت و ظرفیت باربری خود را از دست دادند. در ناوهای جنگی که سرعت بسیار حائز اهمیت بوده و نقش تعیین کننده‌ای دارد، از توربین گازی استفاده می‌شود. آمریکا، کانادا و انگلستان در این صنعت تجربه ی فراوانی دارند. در قایق های سریع و قایق های گشت نظامی نیز از موتور مجهز به توربین گازی استفاده می‌شود. این نوع موتورها سرعت و توان بالایی دارند. در این نوع قایق ها، توربین معمولاً از دو قسمت تشکیل شده است. توربین قسمت فشار قوی برای چرخاندن کمپرسور و توربین قسمت فشار ضعیف که با کاهش سرعت از طریق چرخدنده، پروانه ی کشتی را به حرکت درمی‌آورد. کشتی های جنگی نیز به دلیل نیاز مبرم به قدرت و سرعت، از توربین گازی به جای توربین بخار استفاده می‌کنند در این موارد، انرژی الکتریکی مورد نیاز کشتی نیز از طریق توربین گازی تهیه می‌شود. در نتیجه، حجم قسمت تولید قدرت، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد شکل زیر نشان دهنده یک توربین گازی موتور رولزرویس مورد استفاده در صنایع دریایی است.



http://www.mohandes-iran.com

توربین گازی در صنعت هاورکرافت نیز توسعه ی زیادی یافته است به طوری که در بعضی از هاورکرافت ها، قسمت تولید هوای زیر هاورکرافت، که با توربین گازی کار می‌کند می‌تواند کل وسیله نقلیه را حدود ۸۰ تا ۹۰ سانتی‌متر از روی زمین بلند کرده و به جلو حرکت دهد. این نوع هاور کرافت در سطوح آبی ناآرام و زمینهای ناصاف به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. توربین گازی در صنایع حمل و نقل زمینی مانند راه آهن نیز به کار می‌رفت، اما پس از یکی دو دهه جای خود را به موتور دیزلی داد. اگرچه بعدها قطارهایی با سرعت بالا و مجهز به موتور توربین گازی به بازار عرضه شد، اما در نهایت، قطار الکتریکی از نظر سرعت و قابلیت های مختلف، برتری خود را به اثبات رسانیده است. در حمل و نقل جاده‌ای و اتومبیل ها، توربین گازی با توان پایین‌تر مورد نیاز است، اما تا عملی شدن این طرح، در عمل راهی طولانی در پیش است. مهمترین مشکل در این نوع وسایل نقلیه، تنظیم مصرف سوخت در بارهای پایین است که به سیستم کنترلی پیچیده نیاز دارد.

توربین گازی در تولید انرژی الکتریکی:

توربین گازی به طور گسترده‌ای اولاً در تولید انرژی الکتریکی به ویژه در زمان اوج مصرف و همچنین در بار پایه و ثانیاً به عنوان واحد پشتیبان واحدهای بزرگ بخار، در مواقع اضطراری به کار می‌رود. در آمریکا و انگلستان از این سیستم ها فقط در اوج مصرف استفاده می‌شود. در حالی که در عربستان سعودی، به دلیل فراوانی سوخت، در بار پایه نیز بهره‌برداری می‌شود. علت دیگر این موضوع، نیاز نداشتن به آب برای سیستم های خنک کننده است که در مناطق صحرایی و کم آب، موجب راحتی بهره‌برداری می‌شود. در انگلستان، نوعی از این واحدها با سیستم موتور هوایی که مجهز به توربین های توان بالا بوده و در مدت دو دقیقه، به قابلیت تولید صد درصد بار می‌رسد، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. اگرچه این قابلیت حائز اهمیت است، اما به دلیل تنشهای حرارتی، عمر مفید بین تعمیرات اساسی را کوتاه می‌کند، بدین جهت لازم است فقط در شرایط اضطراری، راه‌اندازی و بهره‌برداری شود.

http://www.mohandes-iran.com

خاموشی بزرگی که در سال ۱۹۶۵ در آمریکا رخ داد سازندگان توربین گازی را بر آن داشت که توربین های گازی را با قابلیت راه‌اندازی مستقل و بدون استفاده از منبع الکتریکی دیگری طراحی کنند. این نوع توربین های گازی در اغلب کشورهای دارای شبکه ی مطمئن تولید برق، نصب شده و در حال بهره‌برداری است. این نوع سیکل های توربین گازی باید در شرایط اضطراری برای تولید برق اصلی و فقط در مدت چند ساعت استفاده شوند. در این رابطه، توربین های گازی با طرح تک‌محوری، توان حدود ۱۴۰ تا ۱۵۰ مگاوات را می‌توانند تولید کنند؛ البته هر روزه مدل‌های جدیدی با توان تولیدی بالاتر ساخته می‌شود. لازم است ذکر شود که حد تولید بالاتر، ناشی از حداکثر ابعادی است که به دلیل حمل و نقل با راه آهن، باید در نظر گرفته شود. در کنار واحدهای الکتریکی با توان بالا، واحدهای کوچک توربین گازی قابل حمل نیز، برای مناطقی که دسترسی به انرژی الکتریکی میسر نیست، ساخته می‌شوند.

توربین های گازی با تولید محدود انرژی الکتریکی :

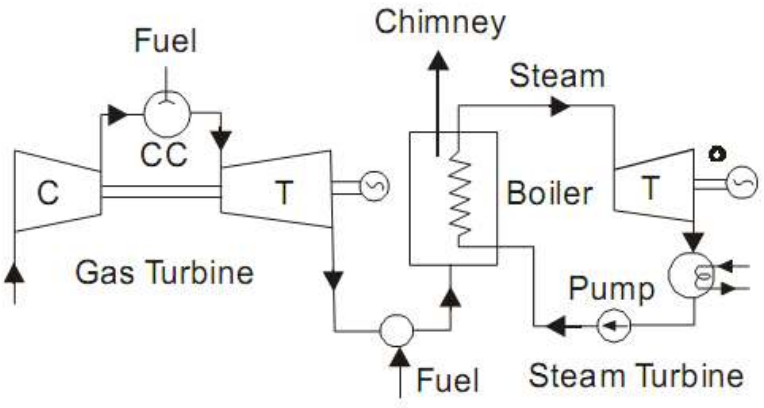
بیشترین کاربرد این نوع توربین های گازی در سکوهای دریایی است که بار پایه را برای بخش های مصرف کننده ی اصلی تأمین می‌کنند. سطح تولید این واحدها معمولاً حدود ۴ تا۴۰مگاوات است. در بعضی از سکوهای نفتی که مصرف انرژی الکتریکی تا ۱۲۵ مگاوات می‌رسد استفاده از واحدهایی با توان تولیدی بالاتر ضروری است. در این صورت به دلیل محدودیت سطح و فضای سکو، در انتخاب توربین گازی، توجه به ویژگی های سطح و حجم، در اولویت قرار می‌گیرند.

توربین گازی در سیکل های ترکیبی

سیکل های ترکیبی نوع دیگری از واحدهای گازی برای تولید الکتریسیته با کارایی در حدود ۵۰ درصد است که برای استفاده در بار پایه در نظر گرفته می‌شود. در کشورهایی که در منابع نفتی محدودیت دارند، استفاده از واحدهای ترکیبی بهینه‌سازی شده با کارایی حرارتی بالاتر، اقتصادی‌تر از واحدهای بخاری یا دیزلی است. هدف از سیکل های ترکیبی، استفاده از حداکثر انرژی حاصل از سوخت است.

http://www.mohandes-iran.com

برای این منظور، توربین گازی، ژنراتور تولید برق را به حرکت درآورده و انرژی حرارتی موجود در دود خارج شده از اگزوز توربین، برای مصارف دیگری استفاده می‌شود. موارد مصرف به فشار و درجه حرارت دود خروجی بستگی دارد و می‌تواند انرژی محدوده ی وسیعی از مصرف کنندگان را تأمین نماید. به عنوان مثال از آن می‌توان برای واکنش های مختلف در مناطق صنعتی یا گرم کردن محیط های مسکونی شهری استفاده کرد. در بعضی از نیروگاه‌ها، دود حاصل از توربین گازی، از داخل بویلر بازیاب می‌گذرد و حرارت دود خروجی توربین گاز، به سیکل آب و بخار منتقل می‌شود. بخار تولید شده، صرف چرخاندن توربوژنراتور واحد بخار شده و در نتیجه انرژی الکتریکی تولید می‌گردد. بخار خروجی توربین فشار ضعیف را برای مصارف صنعتی و خانگی می‌توان استفاده کرد. در این نوع سیستم ها معمولاً از چند واحد توربین گازی به منظور پایداری یا افزایش اطمینان از کارآیی سیستم استفاده می‌شود. دود خروجی از این توربین ها نیز، سیستم بویلر بازیاب را تغذیه می‌کند. در صورت بروز اشکال فنی در یکی از واحدهای توربین گازی و خارج شدن آن از مدار، بهره‌برداری از سیکل ترکیبی ادامه یافته و تولید در بقیه ی مجموعه ی توربین های گازی انجام می‌شود. در بعضی از کشورها، از انرژی حرارتی دود خروجی از اگزوز توربین گازی در مبدل های حرارتی استفاده شده و انرژی حرارتی، به صورت قابل مصرف در محیط های شهری و صنعتی مانند مدارس، اداره‌ها، ساختمان های عمومی، بیمارستان ها، آزمایشگاه ها و غیره به صورت آب گرم یا هوای گرم توزیع می‌شود. به این روش، افزایش کارآیی حرارتی توربین گازی تا حدود ۶۰ درصد امکان‌پذیر است.



Combined Cycle (Co-generation).

http://www.mohandes-iran.com

کاربردهای احتمالی توربین گازی در آینده:

افزایش قیمت سوخت های فسیلی تمیز، ضرورت استفاده از سوخت های فسیلی سنگین را مطرح کرده است. اگرچه از این نوع سوخت ها در واحدهای بخاری که هزینه‌های تعمیراتی سنگینی دارند استفاده می‌شود، اما از آنها در توربین های گازی به صورت عملی تا به حال استفاده نشده است. یکی از روشهای عملی، به کارگیری محفظه‌های احتراق با بسترهای متخلخل است. در این روش، قسمتی از هوای خروجی کمپرسور از مبدلی که در داخل محفظه احتراق با بستر متخلخل قرار گرفته و ضریب انتقال حرارت بالایی دارد عبور می‌کند. قسمت باقیمانده ی هوای خروجی، از طریق خود محفظه ی احتراق که درجه حرارت بالاتری دارد جریان پیدا کرده و پس از تصفیه و جدا کردن ذرات موجود در دود توسط صافی، با هوای خروجی از مبدل مخلوط و به توربین گازی وارد می‌شود. در این صنعت، مسایل خوردگی فیزیکی هنوز مطرح است، اما در صورت برطرف شدن مشکلات، استفاده از ذغال‌سنگ یا سوخت های سنگین، امکان‌پذیر خواهد شد. در این فناوری، به جای استفاده از سوخت های سنگین در محفظه ی احتراق با بستر متخلخل، از زباله‌های غیرفلزی که درجه حرارت کافی را برای توربین گازی تولید می‌کند می‌توان استفاده کرد. البته لازم است دود حاصل از احتراق از صافی های مناسبی عبور کند تا فرسایش فیزیکی توربین را به وجود نیاورد. در این فناوری، آلودگی محیط زیست از موارد مهمی است که باید برطبق استانداردهای مربوط از آن جلوگیری شود.

روش دیگر، تبدیل سوخت های سنگین به سوخت های گازی تمیز، از طریق واکنش تبدیل به گاز است. در این روش نیز ناخالصی‌های حاصل از احتراق مانند سدیم و وانادیم، باید برای جلوگیری از خوردگی توربین گازی، تصفیه می‌شود. ناگفته نماند که گازهای حاصل از احتراق همراه با ترکیبات گوگرد، موجب بروز خوردگی در مسیرهای دود خروجی و آلودگی محیط زیست می‌شود که باید تصفیه شود. سیستم ذخیره ی انرژی، نوع دیگر از استفاده احتمالی از توربین گازی در آینده است. در شبکه تولید برق کشورهایی که سرمایه‌گذاری عظیمی در بار پایه به ویژه در نیروگاه‌های هسته‌ای به عمل آورده‌اند،

http://www.mohandes-iran.com

ضروری است که به طور شبانه‌روزی و مرتب، انرژی الکتریکی در واحدهای اتمی تولید گردد تا هزینه بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری اولیه را جبران کرده و سودآور باشد. در بعضی از کشورها از نیروگاه‌های ذخیره‌ای ئیدروالکتریک استفاده می‌شود و این در صورتی ممکن است که ساخت نیروگاه ذخیره‌ای از نظر شرایط جغرافیایی امکان‌پذیر باشد. در صورت امکان‌ناپذیری استفاده از نیروگاه‌های ئیدروالکتریک، بعضی از کشورها توربین گازی را مناسب‌ترین سیستم ذخیره ی انرژی می‌دانند. در این حالت در ساعات غیراوج مصرف، ژنراتور توربین گازی به عنوان موتور عمل کرده و کمپرسوری را به حرکت درمی‌آورد تا هوا با فشار کافی، در مخزنی که می‌تواند زیرزمینی نیز باشد ذخیره گردد. در این فناوری، در مسیر هوا به سمت مخزن، معمولاً از بسترهای آلومینیومی یا سیلیسی استفاده می‌شود تا انرژی حرارتی هوا در بستر ذخیره گردد. در مواقع احتیاج در ساعات اوج مصرف، هوای فشرده از طریق بستر مزبور به توربین گازی هدایت می‌گردد. در این صورت، ژنراتور از کمپرسور جدا بوده و به عنوان تولید کننده ی انرژی الکتریکی عمل خواهد کرد. به منظور جبران انرژی حرارتی تلف شده، سیستم های احتراق در مسیر هوا نصب و با به کارگیری این سیستم در موقع بهره‌برداری، هوا با درجه ی حرارت بالاتری وارد توربین گازی می‌شود. نکته قابل توجه آن است که اگر مخزن ذخیره کوچک باشد، می‌توان از فشارهای بالاتری برای ذخیره سازی هوا و از کمپرسورهای فشار بالا استفاده نمود. دمای هوای فشرده شده در مخزن ذخیره سازی به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد و این نیز افزایش حجم را به دنبال دارد. برای رفع این اشکال باید هوا خنک شود تا حجم کمتری را اشغال کند. در این راستا از غارها یا معادل مستعمل می‌توان به عنوان مخزن ذخیره هوا استفاده کرد اما بررسی‌هایی از نظر نشتی هوا باید انجام شود تا توجیه اقتصادی پروژه مشخص گردد. توربین های گازی جدیدی که برای موارد تولید انرژی الکتریکی طراحی شده و بکار می روند ، در حالت کلی از نظر اندازه ، مواد به کاررفته در اجزای مختلف و فناوری ، تغییرات اساسی یافته اند .

http://www.mohandes-iran.com

پیشرفت های فنی :

نیاز صنایع هواپیمائی به استفاده از موتوری که بتواند نقیصه بزرگ موتورهای پیستونی یعنی کارکرد نامطلوب موتور در سطوح بالای پروازی را جبران کند باعث تکامل و پیشرفت در زمینه ساخت توربین گاز شده و تا بدانجا پیش می‌رود که از این نوع موتور در قطارها ، کشتی ها ، واحدهای نیروگاهی ، ایستگاه ها ی پمپاژ آب، گاز و .... استفاده‌های دامنه داری می‌گردد . رشد توربین گاز در سال های اخیر را می‌توان به سه عامل دسته بندی کرد:

الف) پیشرفت فن استخراج و ذوب فلزات که امکان بکارگیری آنها را در درجه حرارت‌های بالا در محفظه احتراق و اجزای توربین فراهم نموده است.

ب) زمینه فراوان دانش آیرودینامیک و ترمودینامیک، و استفاده از تکنولوژی کامپیوتر در طراحی و شبیه سازی مقاطع آیرودینامیکی توربین و محفظه احتراق و چگونگی خنک کردن پره توربین.

ترکیبی از موارد بالا ما را به طور مستقیم در بهبود طراحی کمپرسور (افزایش نسبت فشار) ، طراحی محفظه احتراق (کاهش NOx) ، طراحی توربین (خنک‌کاری پره‌های تک بلوری) و روی هم رفته در عملکرد توربین هدایت می‌کند. توربین های گاز ، همواره تحمل طیف گسترده ای از سوختها - از مایعات تا گاز ، با ارزش حرارتی بالا و پایین- و در حال حاضر عملکرد رضایت بخش در گاز (تبخیری) زغال سنگ و چوب را دارا می‌باشند. با توجه به اینکه زغال سنگ بزرگترین منبع انرژی است، حداقل در ایالات متحده آمریکا. یکی دیگر از عوامل کمک کننده به موفقیت توربین گازی، راحتی کنترل و پاسخگویی آن از طریق استفاده از تکنولوژی کامپیوتر می‌باشد. کامپیوترها نه تنها در شروع ، توقف ، و بر عمل لحظه به لحظه بهره‌برداری از توربین گاز (عملکرد کلیه تجهیزات) نظارت دارند، بلکه می تواند گزارش (تشخیص) سلامت واحد، و پیش بینی خطاها و عیوب آتی را ارائه دهند.

توربین های گازی کاربردهای زیادی دارند که ما در این فصل به بخشی از آن اشاره کردیم

http://www.mohandes-iran.com

مزایا و معایب توربینهای گازی:

مزایای توربین گاز با مدار بسته نسبت به مدار باز

۱- بازده حرارتی بالاتر: به ازاء دمای حداکثر و حداقل مساوی برای هر دو نوع توربین، بازده حرارتی در حالت مدار بسته بالاتر است.

۲- اندازه کوچکتر: در سیکل بسته، دانسیته ی سیال عامل کار با قرار دادن آن تحت یک فشار اولیه زیاد بیشتر می‌شود. نظر به اینکه در ماده ی عامل کار لازم نیست که عمل احتراق انجام بگیرد می‌توان از گازهائی که دانسیته ی آنها بیشتر و گرمای ویژه آنها زیادتر می‌باشد، مانند گازهای یک اتمی نظیر کریپتون، آرگون، گزنون و بخار جیوه، به عنوان سیال عامل کار استفاده نمود. زیاد بودن دانسیته ی سیال عامل کار موجب کاهش اندازه ی مولد قدرت، به ازاء قدرت خروجی معین می‌گردد.

۳- بهتر بودن بازده در حالت نیمه‌باز: بازده حالت نیمه باز سیکل مدار بسته در مقایسه با سیکل مدار باز بهتر می‌باشد، زیرا روش کنترل قدرت خروجی در سیکل مدار بسته، دما و نسبت فشار دستگاه و همچنین بازده را در موقع تغییر بار تغییر می‌دهد.

۴- بهتر بودن انتقال حرارت: در این دستگاه مدار انتقال حرارت بهتر می‌باشد.

۵- کمتر بودن تلفات اصطکاکی: تلفات اصطکاکی میان در اثر بالاتر بودن عددرینولدز، کمتر می‌باشد.

۶- نداشتن آلودگی: در دستگاه مدار بسته گازهایی که خاصیت خورندگی داشته باشد گردش نمی‌کند. نظر به این که سیال عامل کار، گازهای احتراق را در بر ندارد، توربین و بازیاب حرارتی در معرض رسوبات کربن قرار نمی‌گیرند و نسبتا تمیز باقی می‌مانند. کمپرسور نیز عاری از گرد و خاک و رسوبات و مواد خارجی باقی می‌ماند، زیرا سیال عامل کار قبل از هدایت شدن به داخل

http://www.mohandes-iran.com

دستگاه تمیز می‌گردد. این مزیت نقش مهمی را در افزایش عمر دستگاه و همچنین بازده آن در مقایسه با مولد قدرت با سیکل باز ایفا می‌کند.

۷- قدرت خروجی بیشتر: با استفاده از سیکل بسته، امکان به دست آوردن قدرت خروجی بسیار زیادتری وجود دارد و این مستلزم زیاد شدن وزن موتور نیست.

۸- ارزان‌تر بودن سوخت: نظر به اینکه در سیکل بسته گرم کن خارجی به کار می‌رود از هر سوخت جامد ارزانی مانند ذغال نیز می‌توان استفاده نمود.

۹- تلف نشدن ماده ی عامل کار: سیال عامل کار در دستگاه باقی می‌ماند.

معایب توربین گاز با مدار بسته نسبت به سیکل باز

۱- وابستگی دستگاه به آب خنک کننده برای خنک کردن اولیه: این وابستگی مانع آن می‌شود که این مولد قدرت روی وسائل نقلیه هوایی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- نیاز به گرم کن هوایی بزرگ و سنگین.

۳- پیچیدگی: کنترل بار دستگاه مدار بسته نسبت به دستگاه مدار باز پیچیده و گران می‌باشد. نظر به اینکه فشار اولیه یعنی فشار ورودی کمپرسور زیاد است و سیال عامل کار، ماده‌ای غیر از هوا می‌باشد، دستگاه باید در برابر فشار زیاد آب‌بندی باشد که بر گرانی دستگاه می‌افزاید و با بعضی از مشکلات مهندسی همراه می‌باشد.

مزایای توربین گازی

الف) واحدهای گازی بخاطر جمع کوچک و ساده بودن نصب خیلی سریع نصب می شود.

ب) واحدهای گازی بعد از استارت، در عرض چند دقیقه (معمولاً کمتر از ده دقیقه) به مرحله بازدهی می رسند که در این زمان کوتاه، توربین های گازی را قادر ساخته است که برای منظورهای اضطراری و در مواقعی که ماکزیمم مصرف برق را در سیستم قدرت داریم مورد استفاده قرار گیرد. در ضمن تغییر بار (قدرت تولید) در این واحد، سریع صورت می گیرد.

http://www.mohandes-iran.com

ج) قیمت و هزینه نصب واحدهای گازی پایین است (حدود $\frac{1}{3}$ واحدهای بخار برای قدرت برابر)

د) به علت سادگی ساختمان و کم بودن قسمت های کمکی و نوعی در توربین گاز بهره برداری از آن آسان می باشد. در ضمن در واحدهای گازی امکان کنترل و بهره برداری در محل و از راه دور وجود دارد.

هـ) در توربین های گازی، امکان استفاده از سوخت های مختلف و تعویض نوع سوخت در حال کار واحد به هنگام باردهی، قدرت مانور خوبی به واحد می دهد.

۱- توربین گازی نسبت به وزن آن توان زیادی تحویل می دهد.

۲- موتورهای توربین گازی کوچکتر از توربین های دیگر هستند.

۳- عرضه فراوان گاز طبیعی به عنوان سوخت

۴- امکان بکارگیری توربین گازی با راندمان حرارتی بالا

۵- قابلیت و کارائی بالا

۶- امکان تجهیز توربین های گاز به محفظه احتراق با سیستم مخصوص تقلیل اکسید نیتروژن که به این ترتیب می‌توان تجهیزات سیکل ترکیبی با بازدهی حرارتی بیش از ۵۰٪ ایجاد کرد . این سیستم کمترین آلودگی را از نظر تولید گازهای سمی خروجی از دودکش نیروگاه ایجاد می کند .

۷- نیاز به سرمایه گذاری اولیه اندک .

۸- قابلیت حمل و نصب تجهیزات توربین گازی در کوتاه ترین زمان .

۹- عدم نیاز به آب فراوان

۱۰- و مهمتر از همه تفاوتی که نیروگاههای گازی با سایر نیروگاهها دارند ، امکان تبدیل آنها به سیکل ترکیبی است که ترکیبی از یک یا چند واحد توربین گازی که در کنار تأسیسات بویلر نصب می‌شود ، با یک توربین بخار است . که بدین ترتیب نیروگاه سیکل ترکیبی در حال حاضر تجسم عینی تأسیسات تولید برق است که بالاترین راندمان را در استفاده از انرژی گرمائی دارد . (رکورد ۶۰٪ نیز بدست آمده است) .

http://www.mohandes-iran.com

معایب توربین گازی:

الف) راندمان یا بازدهی واحدهای گازی به خاطر دفع مقدار زیادی انرژی، به صورت گرما از اگزوز، (برای یک واحد گازی با قدرت ۲۵ مگاوات دمای خروجی اگزوز، بیش از ۵۰۰$\mathring{C}$ می باشد) و تشعشع مقداری گرما از جدار اتاق احتراق، پایین تر می باشد (ماکزیمم تا حدود ۲۷٪ برای سیکل ساده)

ب) چون در واحدهای گازی، معمولاً از گاز طبیعی یا سوخت های سبک استفاده می کنند، لذا مخارج جاری آنها بالا می باشد (به علت گرانی اینگونه سوختها)، ولی در عوض میزان آلودگی محیط زیست نسبت به سایر نیروگاه های حرارتی دیگر با قدرت مشابه کمتر است.

۱-آلودگی محیط زیست زیاد است.

2-عمرآن کم است (فرسودن توربین وکمرسور)

۳- استهلاک زیاداست . (پره توربین ، پره کمپرسور)

۴-راندمان کم است . (مصرف سوخت آن زیاد است) ؛ این نقیصه ای است که کشورهای اروپایی باآن مواجهند.

۵-حدود ۱/۳ توان توربین صرف کمپرسور می شود . بنابراین درنیروگاه گازی برای استفاده درازمدت اصلا جایز نیست چراکه هزینه مصرف سوخت گران است ..

۶-نیروگاه های گازی رااگربخواهیم برای مدت طولانی استفاده کنیم ، هزینه نیروگاه گازی بالا ست.

نیروگاه گازی راازجایی استفاده کنند که امکان بهره برداری زمان بهره برداری زیر ۲۰۰۰ ساعت باشد .

اگرزمان بهره برداری بالای ۲۰۰۰ ساعت باشد (رسال) نیروگاه بخار اگرزمان بهره برداری درسال بالای ۵۰۰۰ساعت باشد ، نیروگاه آبی استفاده می شود.

درکشورما برق عمده مصرفی برق خانگی است (۶۰٪) وحدود ۳۰ ٪ برق صنعتی است .

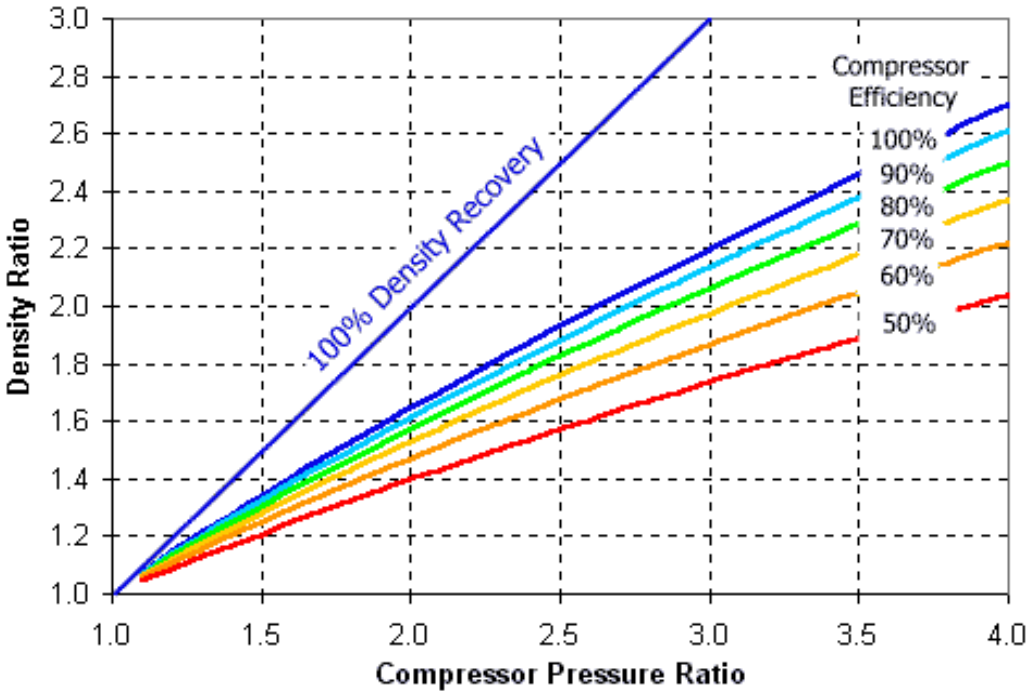
درنتیجه 50 % نیروگاه های کشورباید هرشب روشن شود ؛ بنابراین قسمت عمده برق تولیدی ما باید ازنوع نیروگاه گازی باشد .

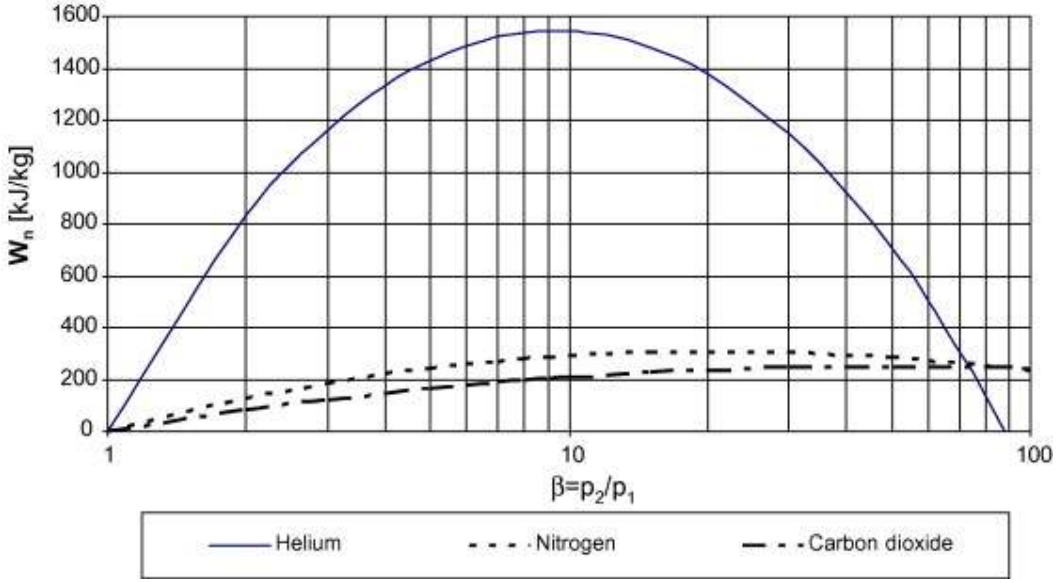
http://www.mohandes-iran.com

نیروگاه گازی رابه دلیل ارزانی درکارخانجات نیز می توان به کاربرد .نیروگاه گازی را درنیروگاه اتمی نیزاستفاده می شود جهت سردکردن رآکتور به کارمی رود که درنتیجه هواداغ وفشرده می شود ودرنتیجه به نیروگاه گازی داده وبرق مصرفی نیروگاه اتمی راتأمین می کنند.

http://www.mohandes-iran.com

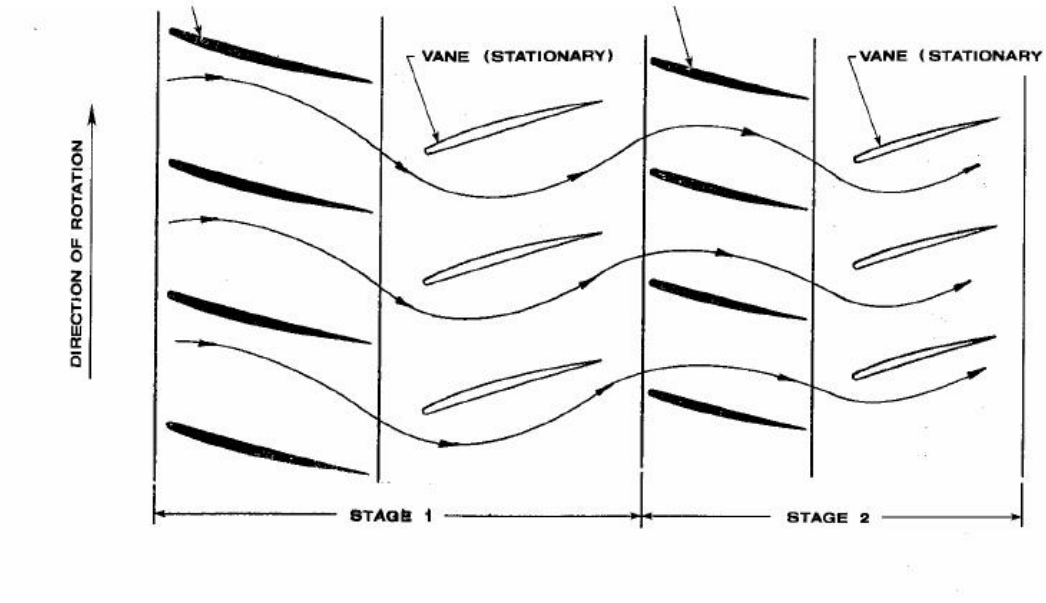
ضمیمه :

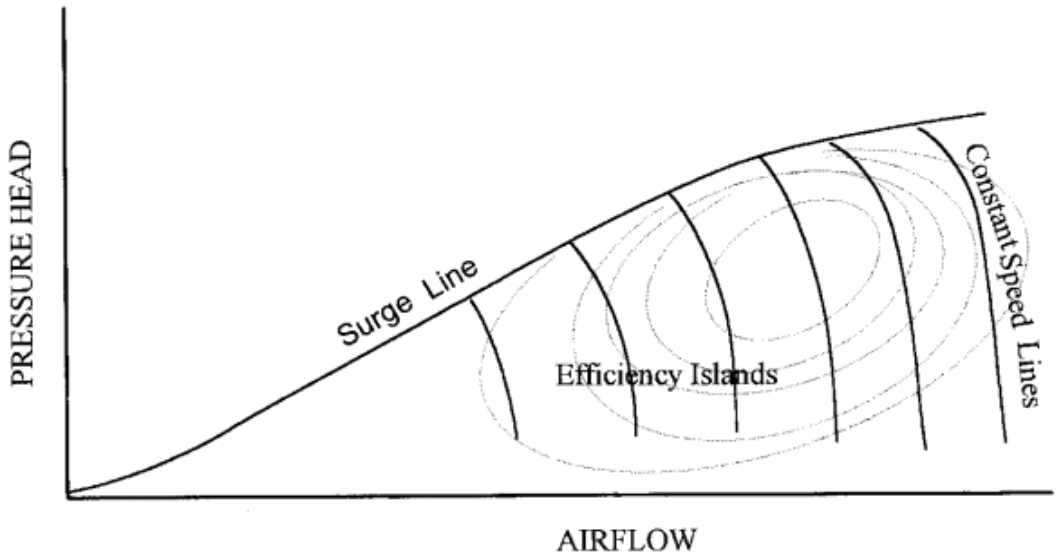




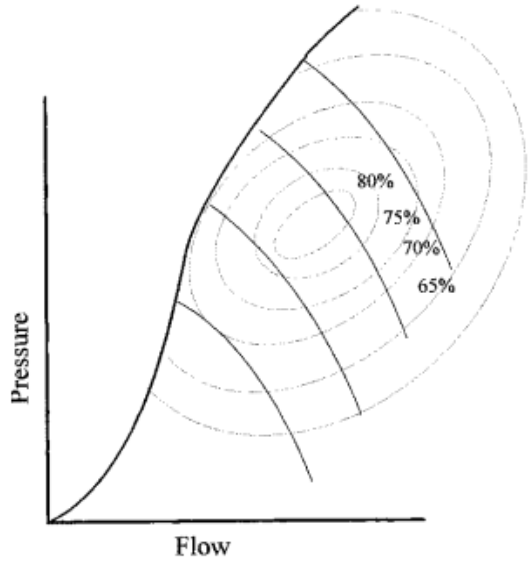
http://www.mohandes-iran.com

Axial Flow Compressor Stages

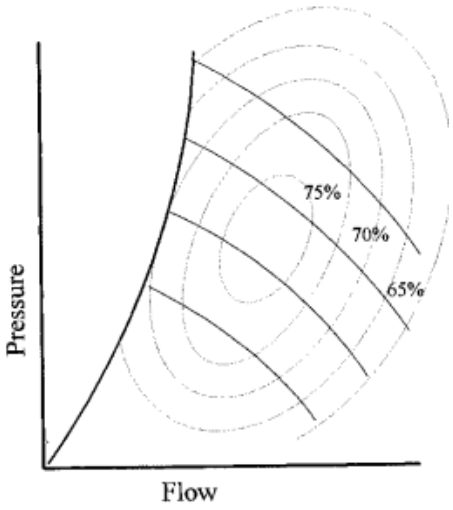




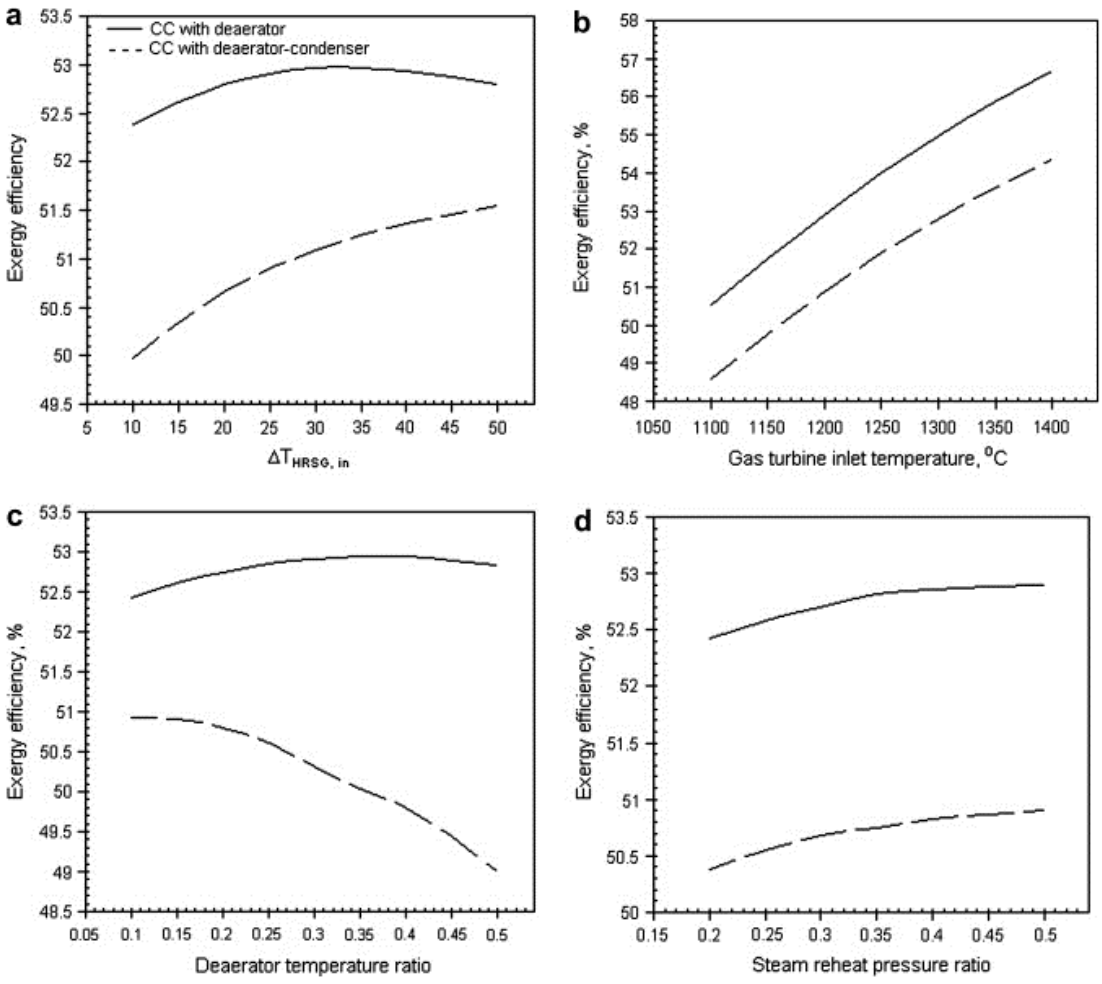
http://www.mohandes-iran.com



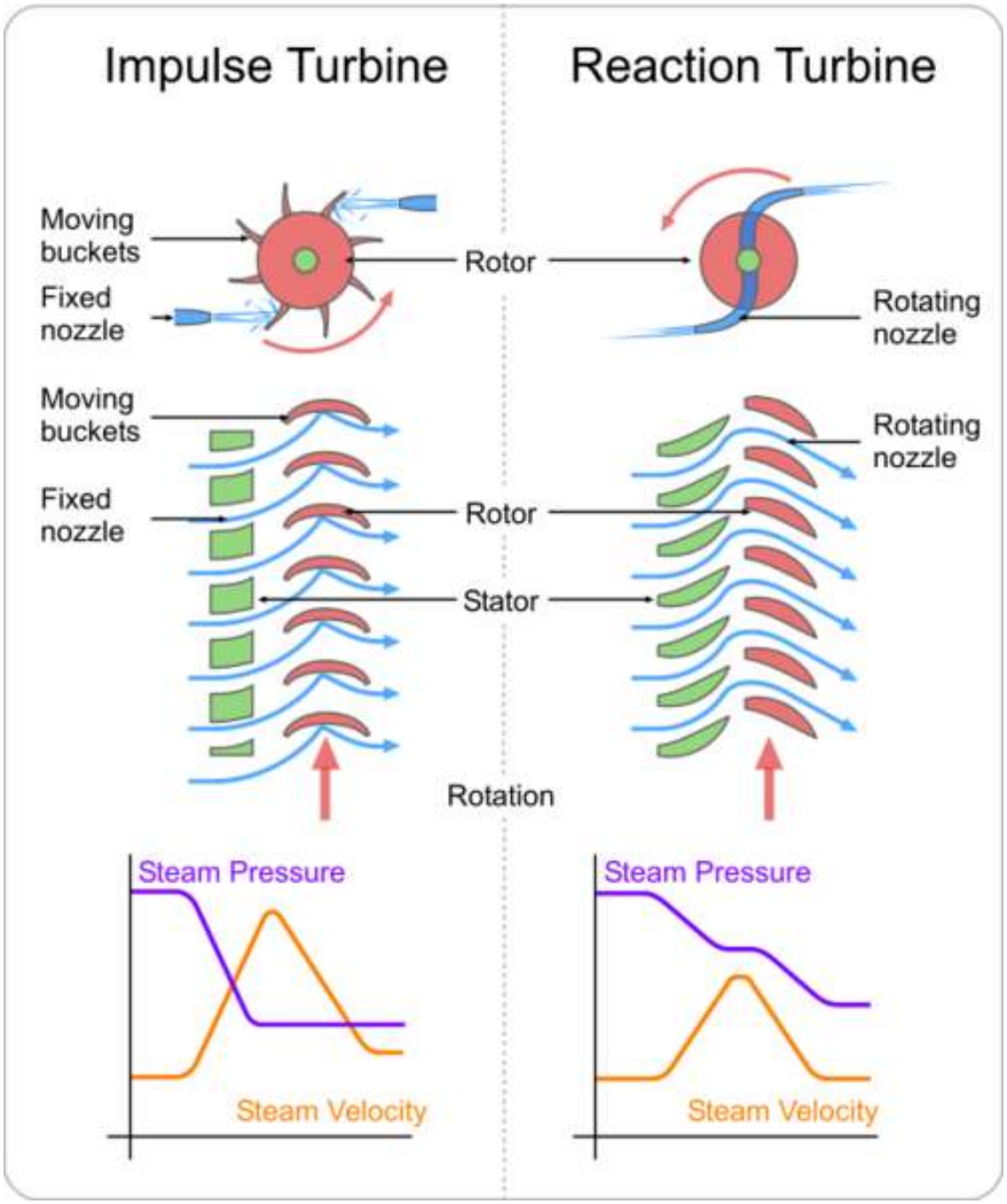
Axial Compressor



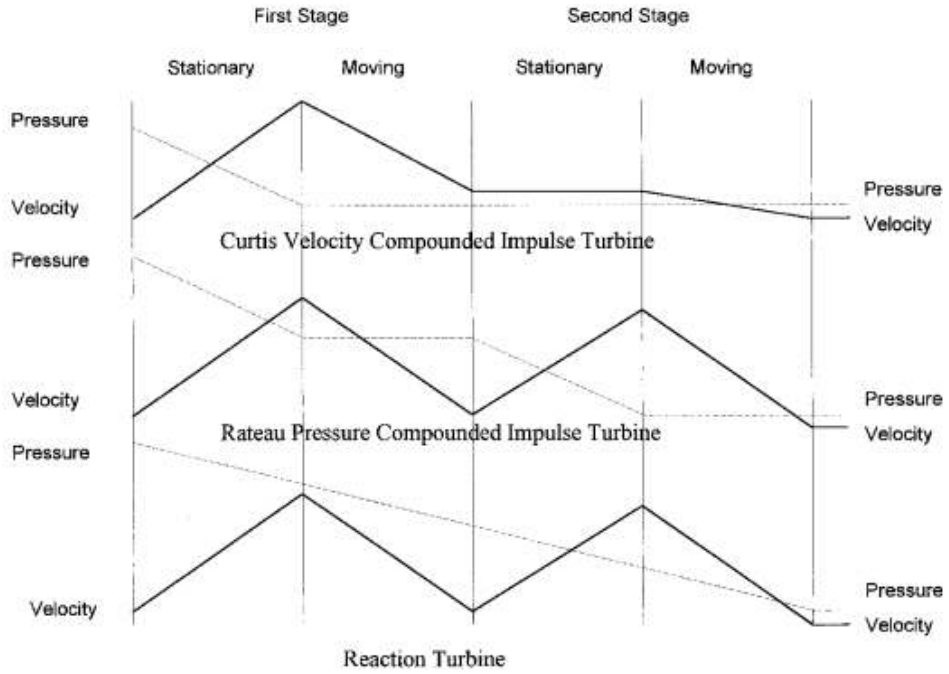
Centrifugal Compressor



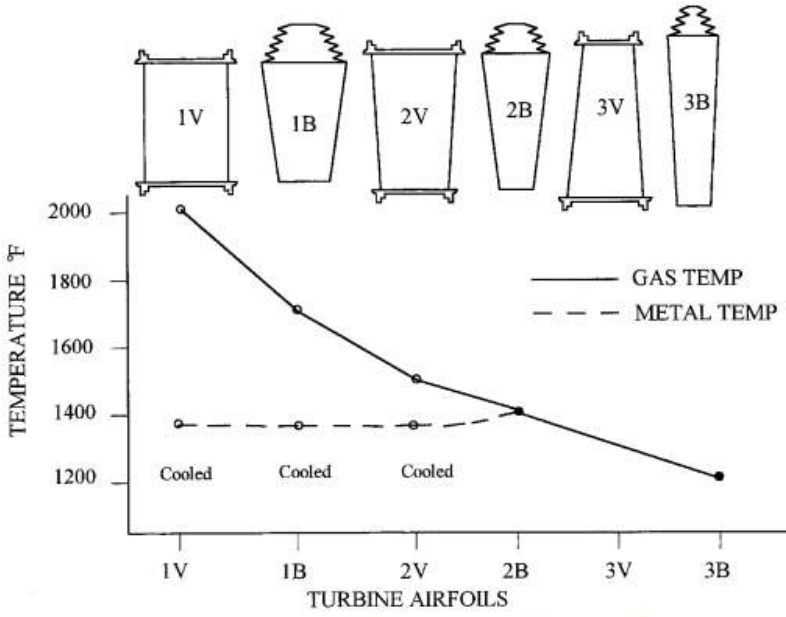
http://www.mohandes-iran.com



http://www.mohandes-iran.com

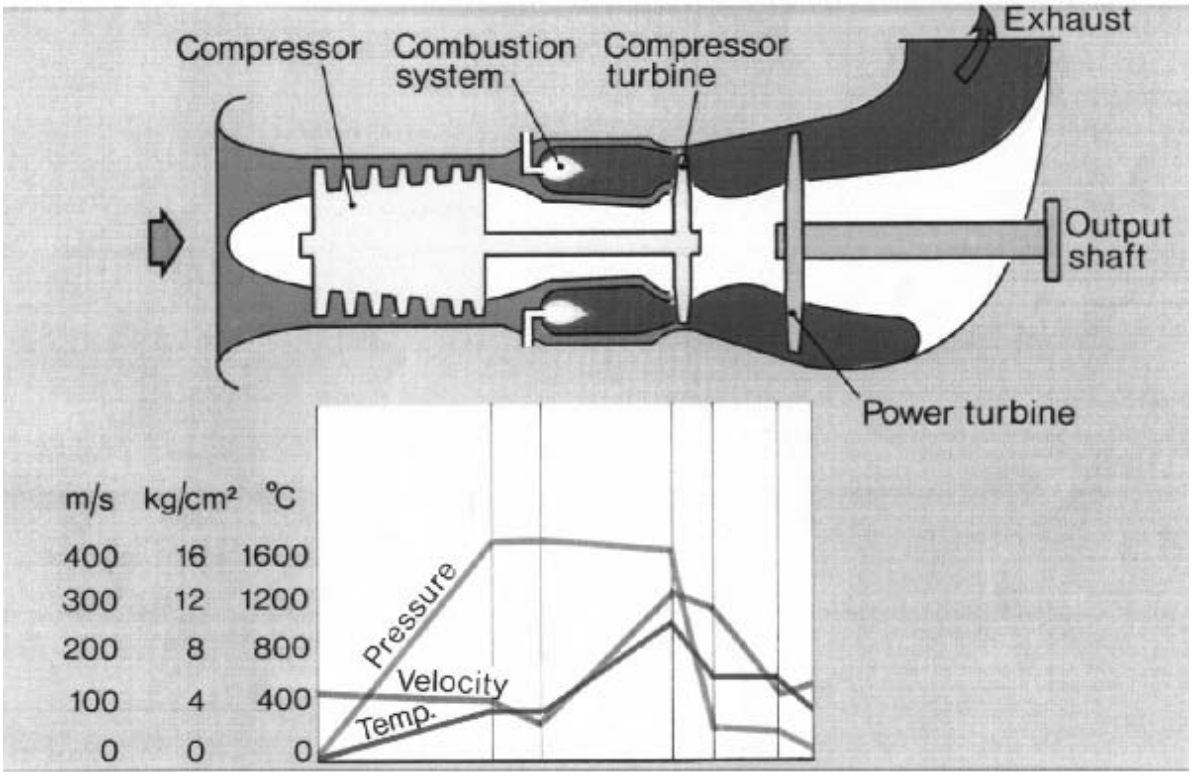


Impulse and reaction turbine pressure & velocity pro-

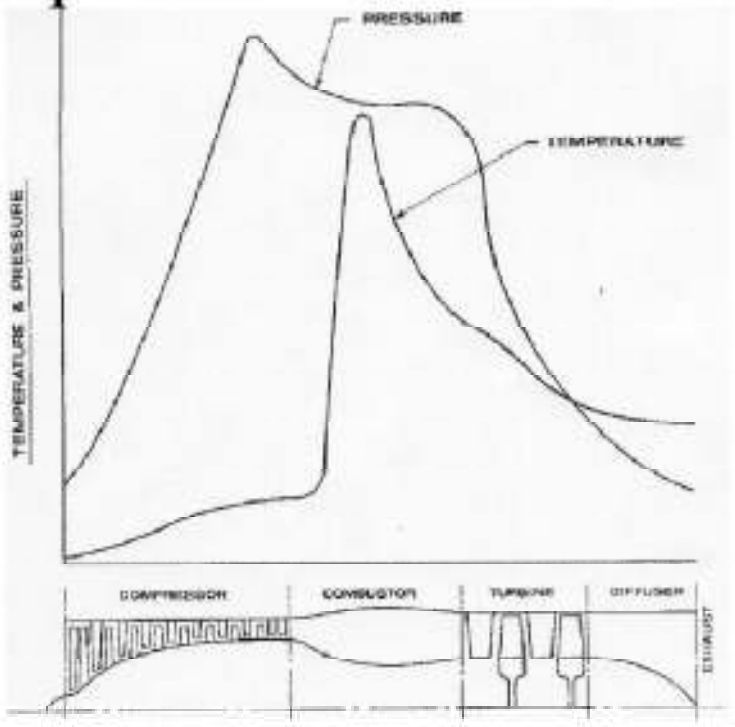


Turbine temperature profile.

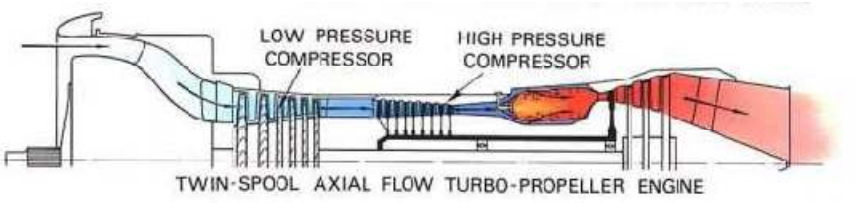
http://www.mohandes-iran.com



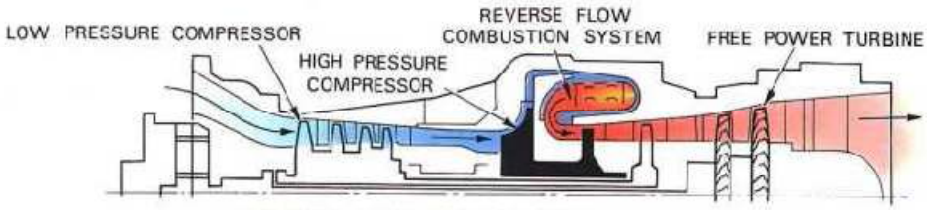
Temperature-Pressure Profile



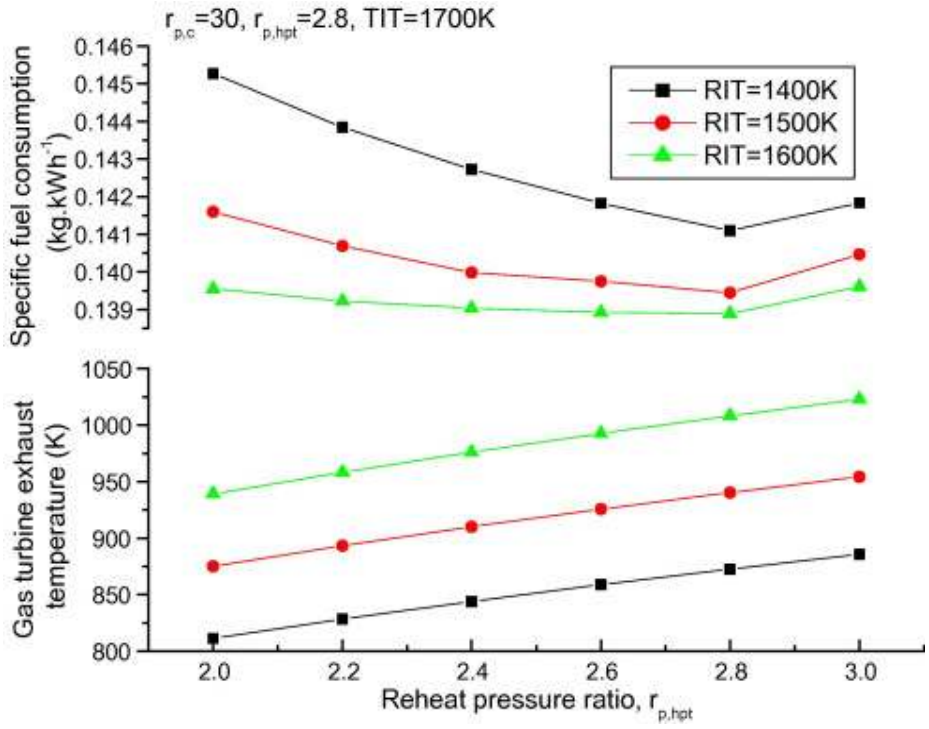
http://www.mohandes-iran.com



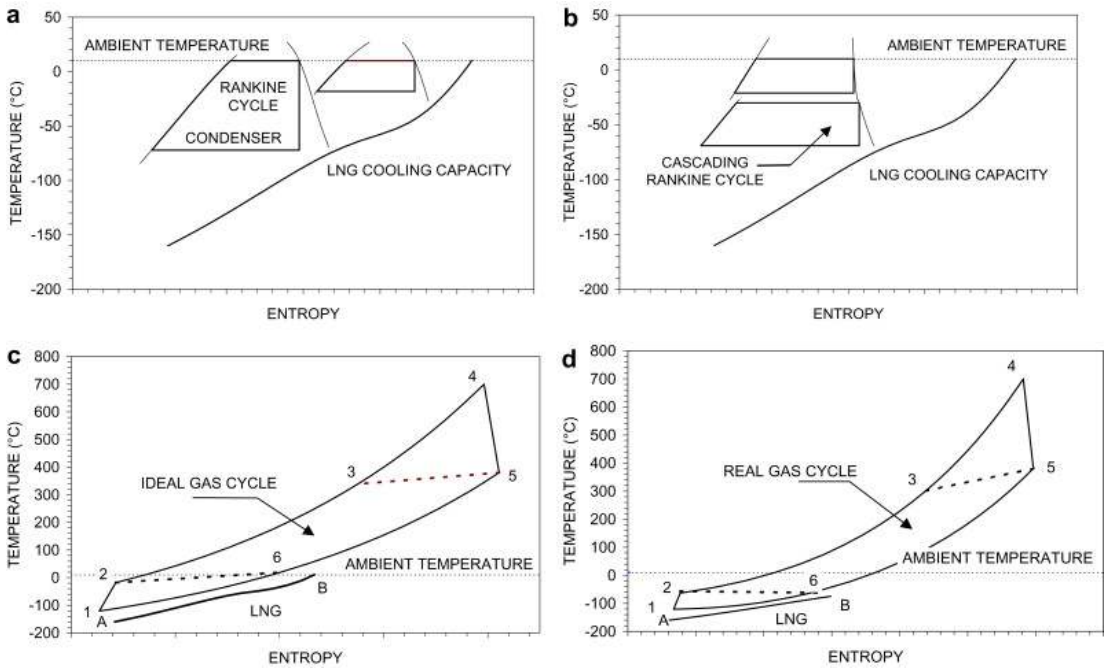
TWIN-SPOOL AXIAL FLOW TURBO-PROPELLER ENGINE



TWIN-SPOOL TURBO-SHAFT ENGINE (with free power turbine)

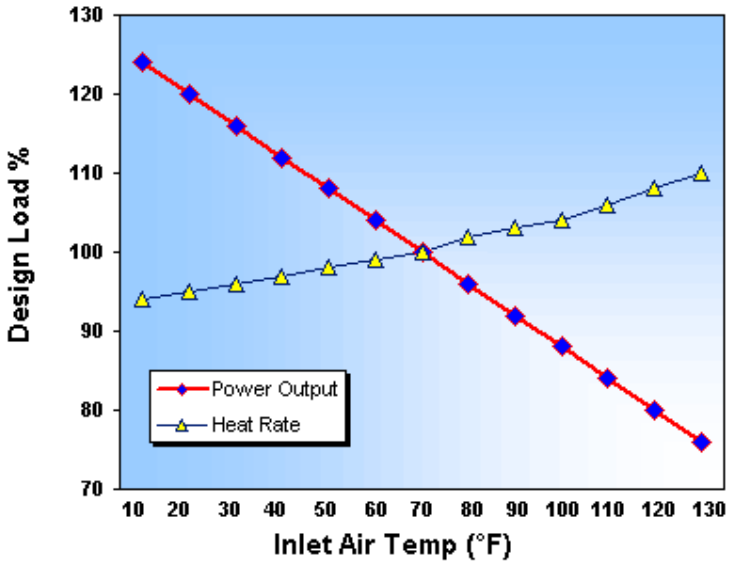


http://www.mohandes-iran.com

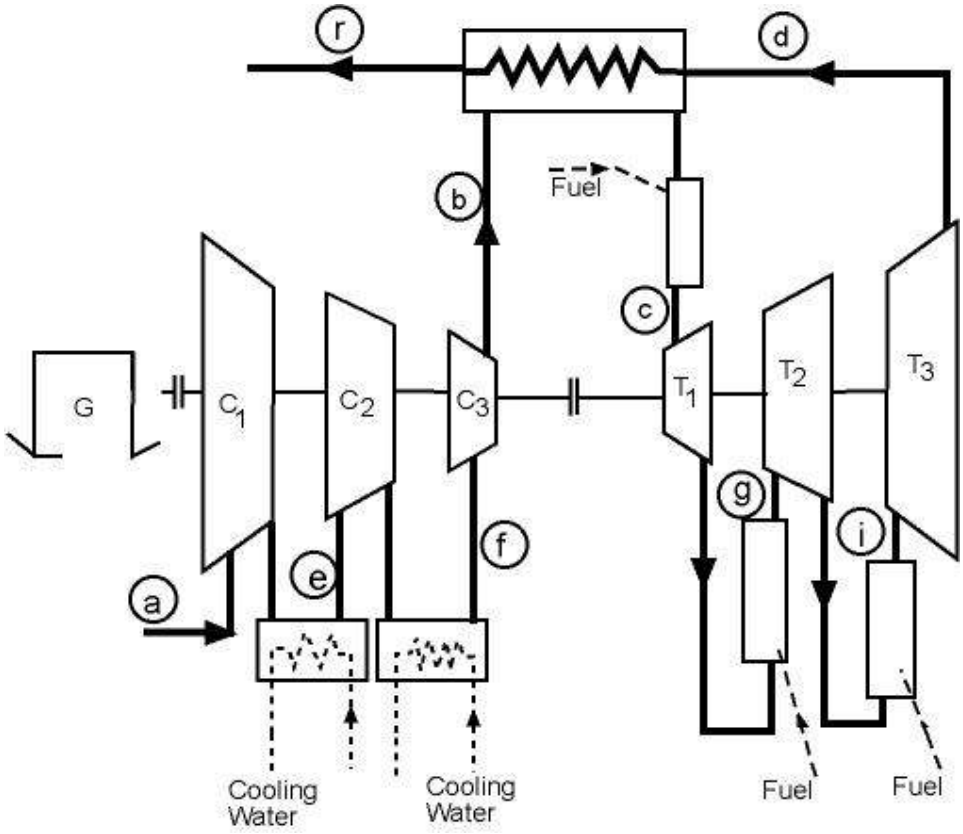


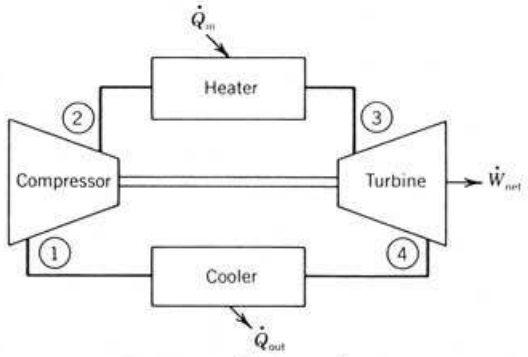
Typical Gas Turbine Performance

Inlet Air Temperature vs. Design Load

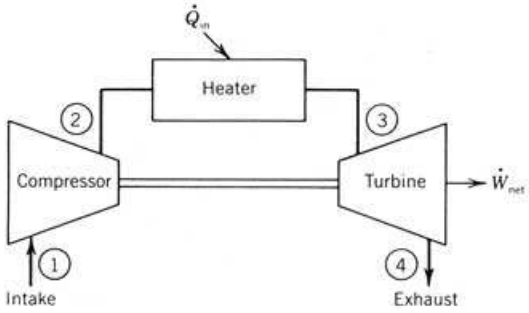


http://www.mohandes-iran.com



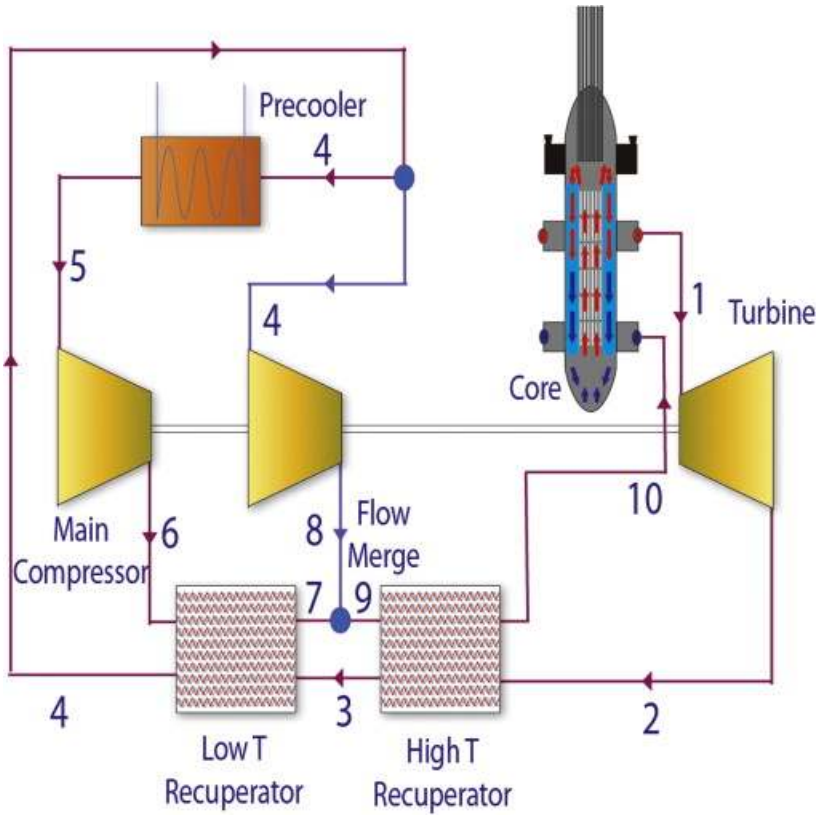


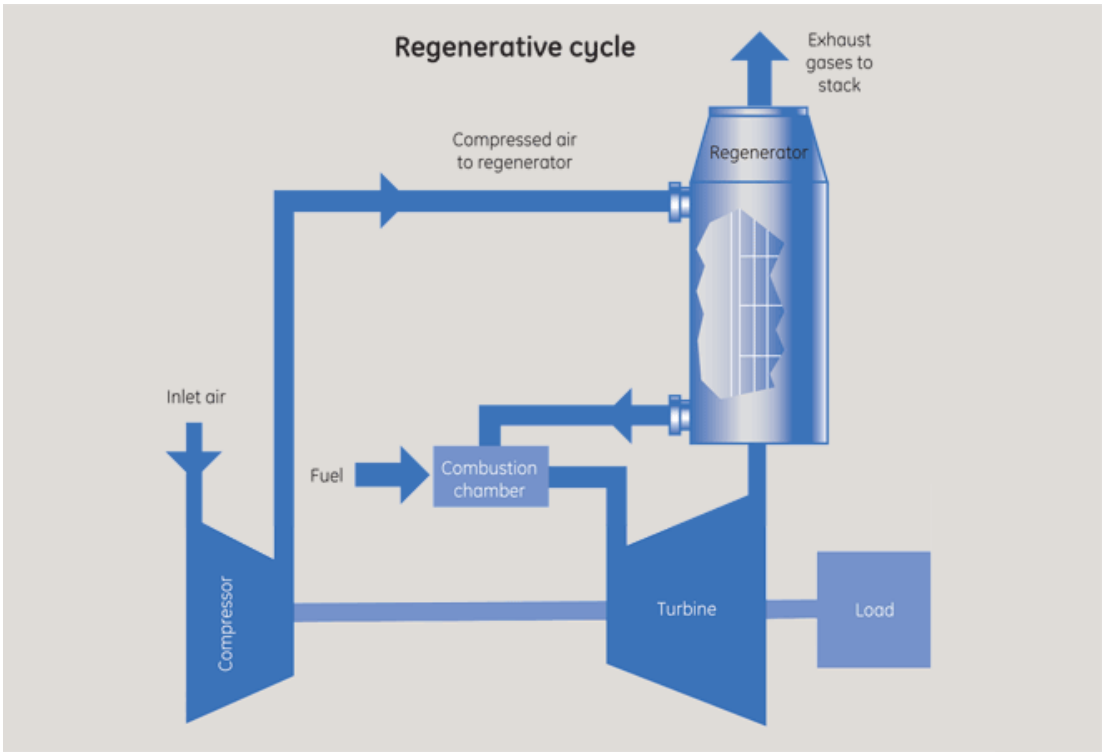
Simple closed Brayton cycle



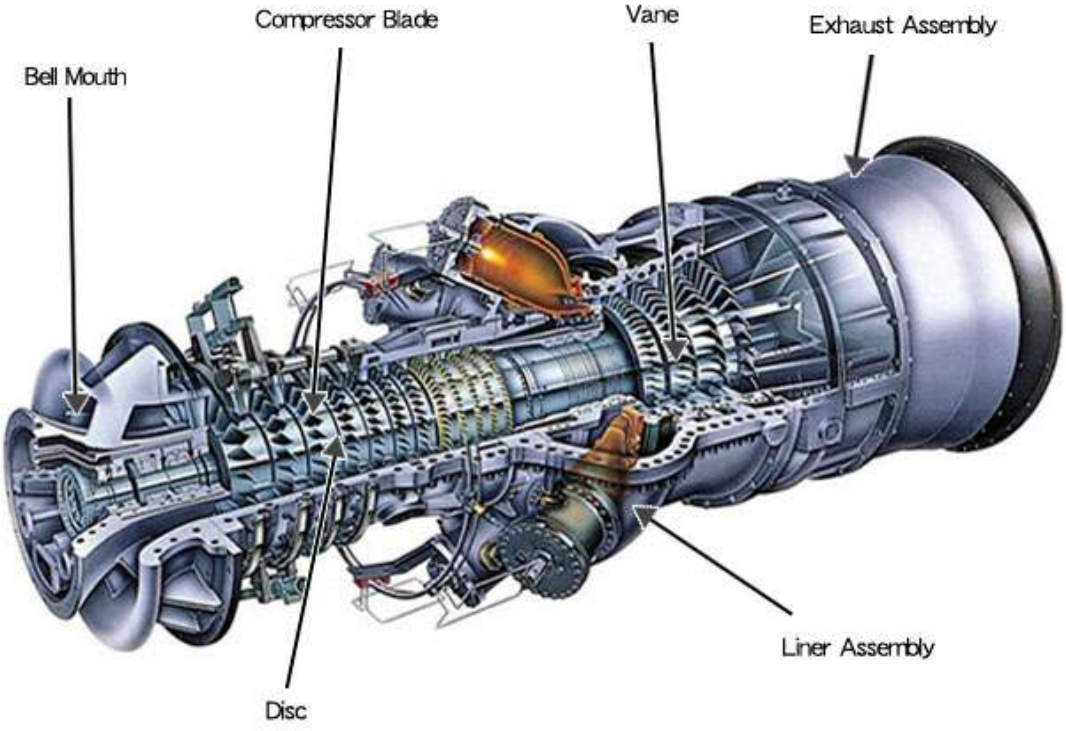
Simple open Brayton cycle

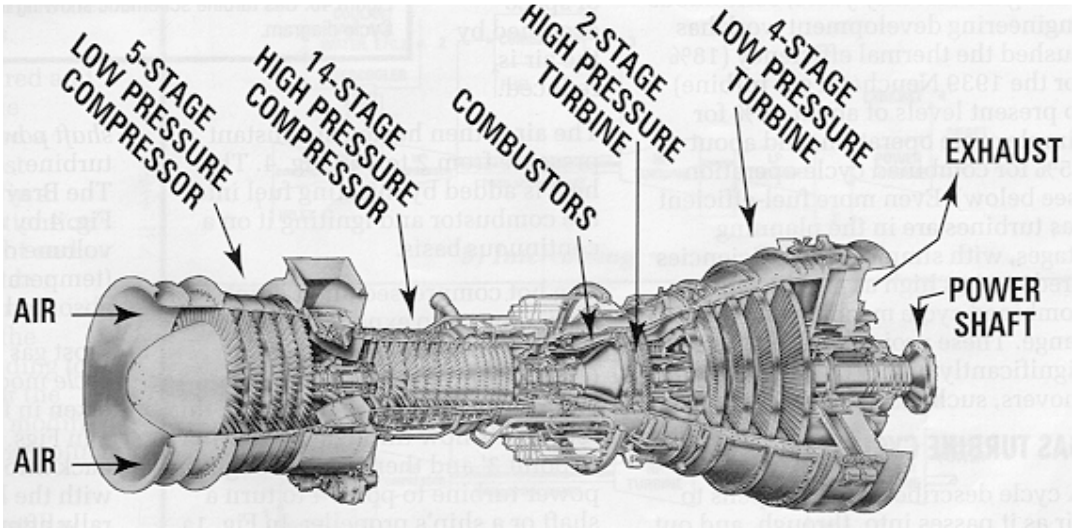
http://www.mohandes-iran.com



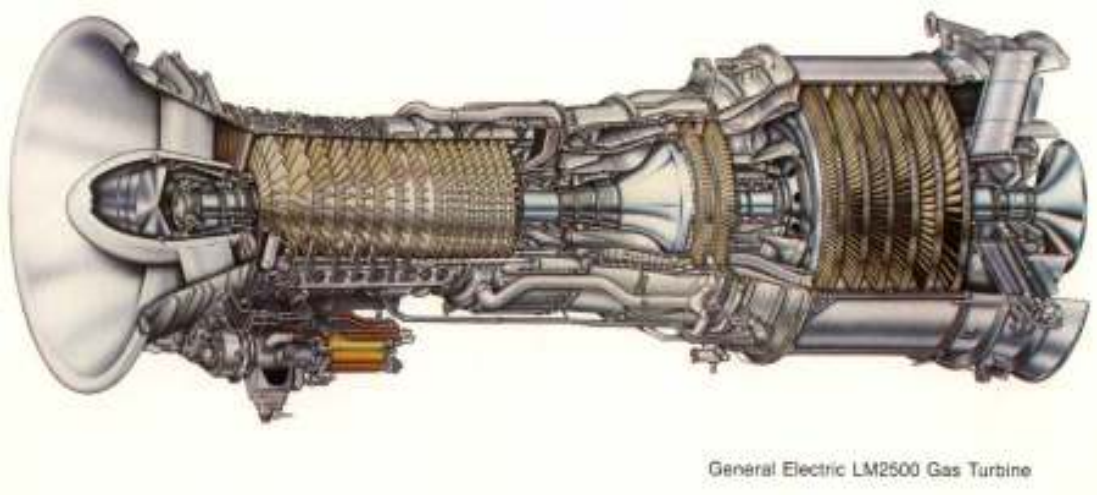


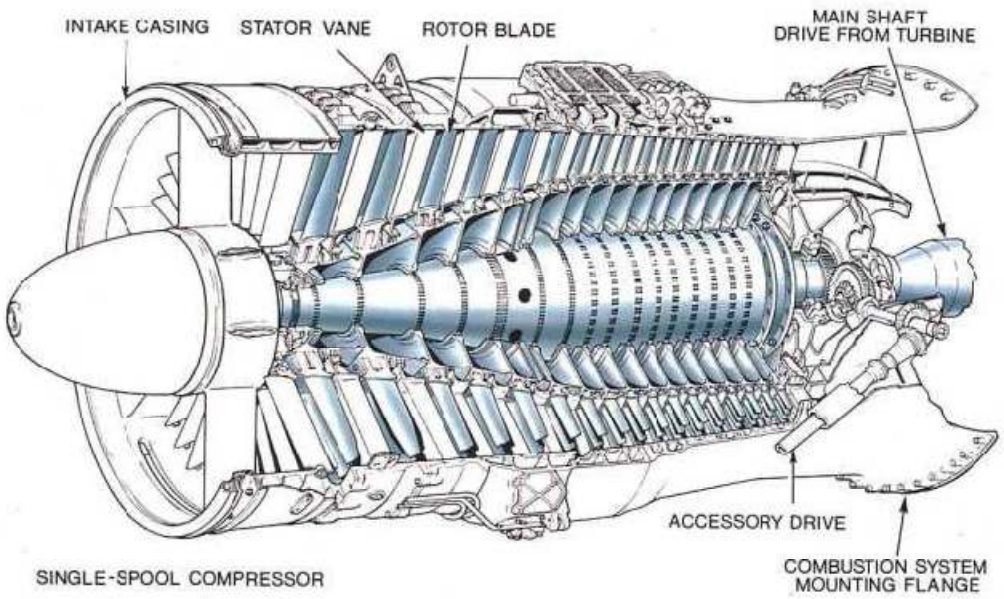
http://www.mohandes-iran.com





http://www.mohandes-iran.com





نمونه ای از یک متور جت مورد استفاده در صنایع هوایی

http://www.mohandes-iran.com

Reference:

منابع:

[1] R.D.Zucker and O.biblarz , Fundamentals of gas dynamic . Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey ,second Edition 2002

[2] A.Giampaolo ,gas turbine handbook Principles and Practices ,CRC press , 3rd Edition 2006

[3] A.K.Raja.Power plant engineering , New Age International (P) Ltd., Publishers,2006 new age

[4] h.raiesi fard , gas turbine, islamic azad university of Qazvin .spr.2009

[5]] Industrial gas turbines: Performance and operability, Robin Elder,2007

[6] h.mohammadi .gas turbine, elmi karbordi university.wit.2010

[7] F.jabari.F.hojati parast , gas station .2011

[8] thermodynamic of gas turbine ,www.noandishaan.com/forums/index.p

[9] A.Avallon ,Marks Standard Handbook for Mechanical Engineers E, ugene

۱۰.کتاب بهره برداری از تجهیزات نیروگاهی .انتشارات برق منطقه ای شیراز

۱۱ .کتاب نیروگا ههای بخاری . ترجمه محمد الوکیل

۱۲ .کتاب بهره برداری توربین(نیرو گاه زرگان اهواز)

۱۳. جزوه توربین . دانشکده صنعت آب و برق(دانشکده عباسپور)

۱۴. ترمودینامیک . سیامک کازم زاده و مهدی کارزار. دانشگاه صنعتی شریف.فصلنامه تبدیل انرژی

۱۵.اصول دستگاه ها و طرز کار توربین های احتراقی گازی، شرکت ملی نفت مناطق نفت خیز جنوب، مرکزآموزش فنون شهید مجدزاده، قسمت آموزش مکانیک و توربین، مهرماه ۸۵

http://www.mohandes-iran.com

Abstract:

Gas turbines are driving their mentors in other words they are the energy production therefore uses the frequency for different industries in energy production are included in the petroleum industry for the rotating equipment and bringing into circulation in power plant engineering for the production of power.
Since the birth of modern gas turbine in comparison with other power production equipment, there is not a lot of time with this today, as the important system of mechanical strength in production are introduced. Vanerzi of electrical energy to fly the supersonic plane and all indebted to use this utility. The advent of gas turbine blades causes a lot of progress in the field of mechanical engineering, metallurgical engineering, oil and ga engineering (chemical engineering) the appropriate sairalom wheelchair.

The term gas turbine as a general term for all types of turbine engines used gas turbine has three main sections, which are: the compressor turbine and combustion power wheelchair that we've dealt with these three parts described in detail this thesis in conjunction with this device and application and the description that proves that this huge applications is what device.
The gas turbine obtains its power by utilizing the energy of burnt gases and air, which is at high temperature and pressure by expanding through the several ring of fixed and moving blades. It thus resembles a steam turbine. To get a high pressure (of the order of 4 to 10 bar) of working fluid, which is essential for expansion a compressor, is required.

http://www.mohandes-iran.com